암흑물질 이론

신창섭 (충남대학교)

@ KIAS Particle Physics Summer Camp 2022 (Aug. 22-25)

차 례

암흑물질 패러다임

우주 천문학적 이상현상들 : 질량 손실 문제,

은하 거대 구조 형성, 우주배경복사 스펙트럼, 표준우주모형

암흑물질 탐구

암흑물질에 대한 질문들

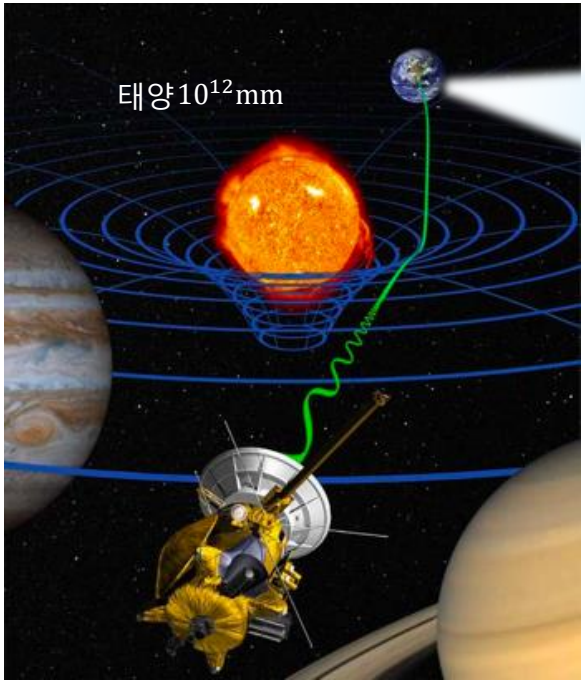
암흑물질의 조망 : 기본단위의 질량과 상호작용

대표적인 (나름의 이유로 활발하게 연구되고 있는) 암흑물질 후보들 소개

- WIMP (윔프 : 약하게 상호작용하는 무거운 입자)
- Axion (액시온 : 가벼운 스칼라 보존 입자)
- Primordial Black Hole (원시 블랙홀 : 별의 진화가 아닌 우주 초기에 생성된 블랙홀)

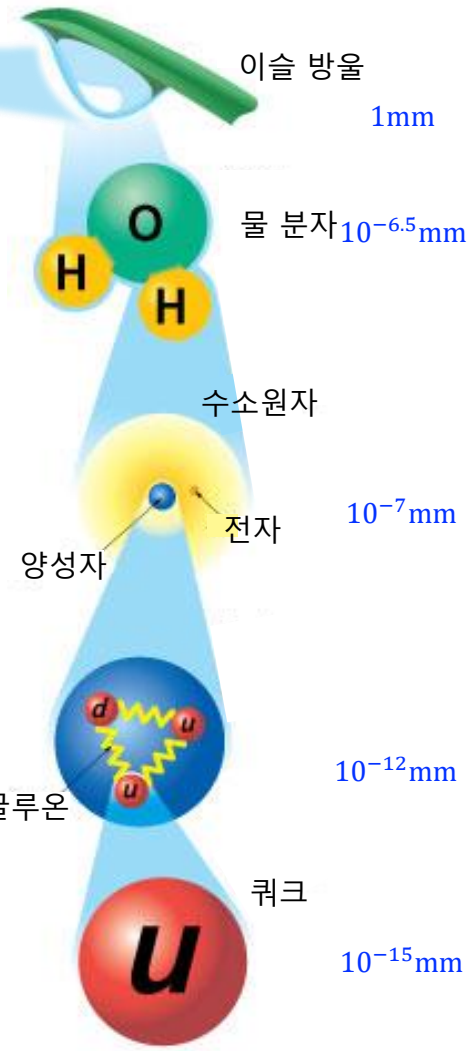
암흑물질 패러다임

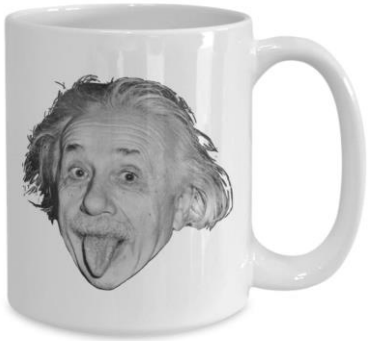
현대 기초물리의 두 기둥: 일반상대성이론 & 표준모형





지구 10^{10}mm



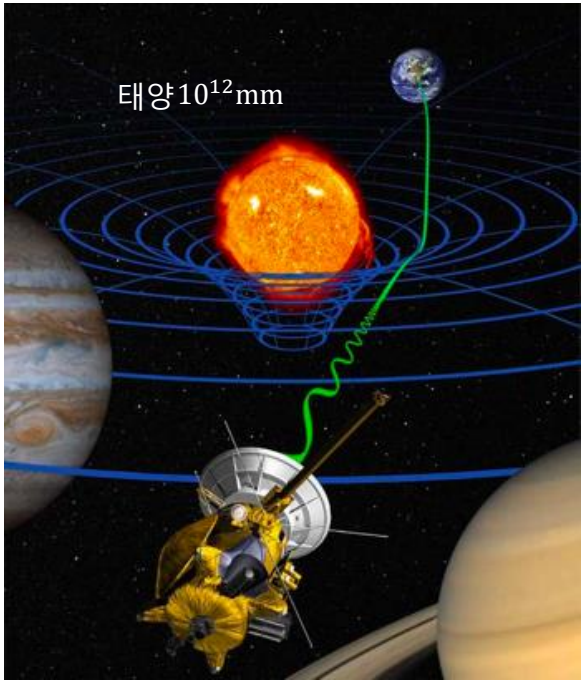


중력 = 시공간의 휘어짐



기본 입자= 쿼크, 렙톤, 광자, W/Z, 글루온+힉스 보존

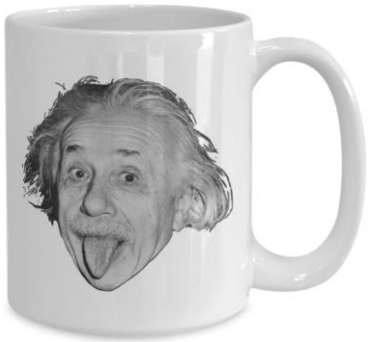
기본 법칙의 우주, 천문학적 이해



중력이 지배적인 힘으로 물체의 움직임을 결정할 것으로 예상되는 우주, 천문학적 관측은 중력법칙이 얼마나 정확한지를, 혹은 물질의 질량 및 에너지가 어떻게 분포하는지를 알려준다.

$$m\ddot{x} = -\nabla V_g, \qquad V_g = -\frac{GMm}{r}$$

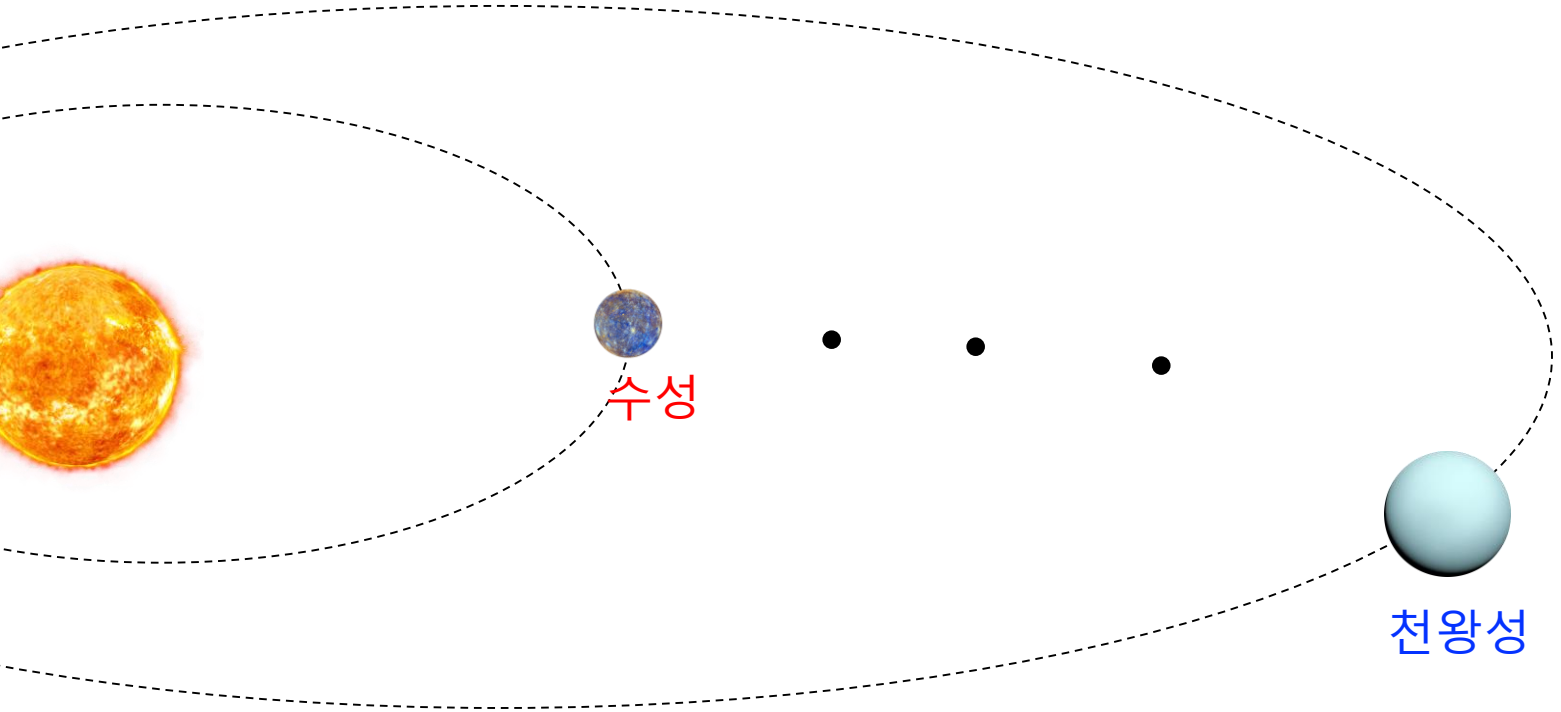
$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\rho\sigma}\frac{dx^\rho}{d\tau}\frac{dx^\sigma}{d\tau} = 0, \qquad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$





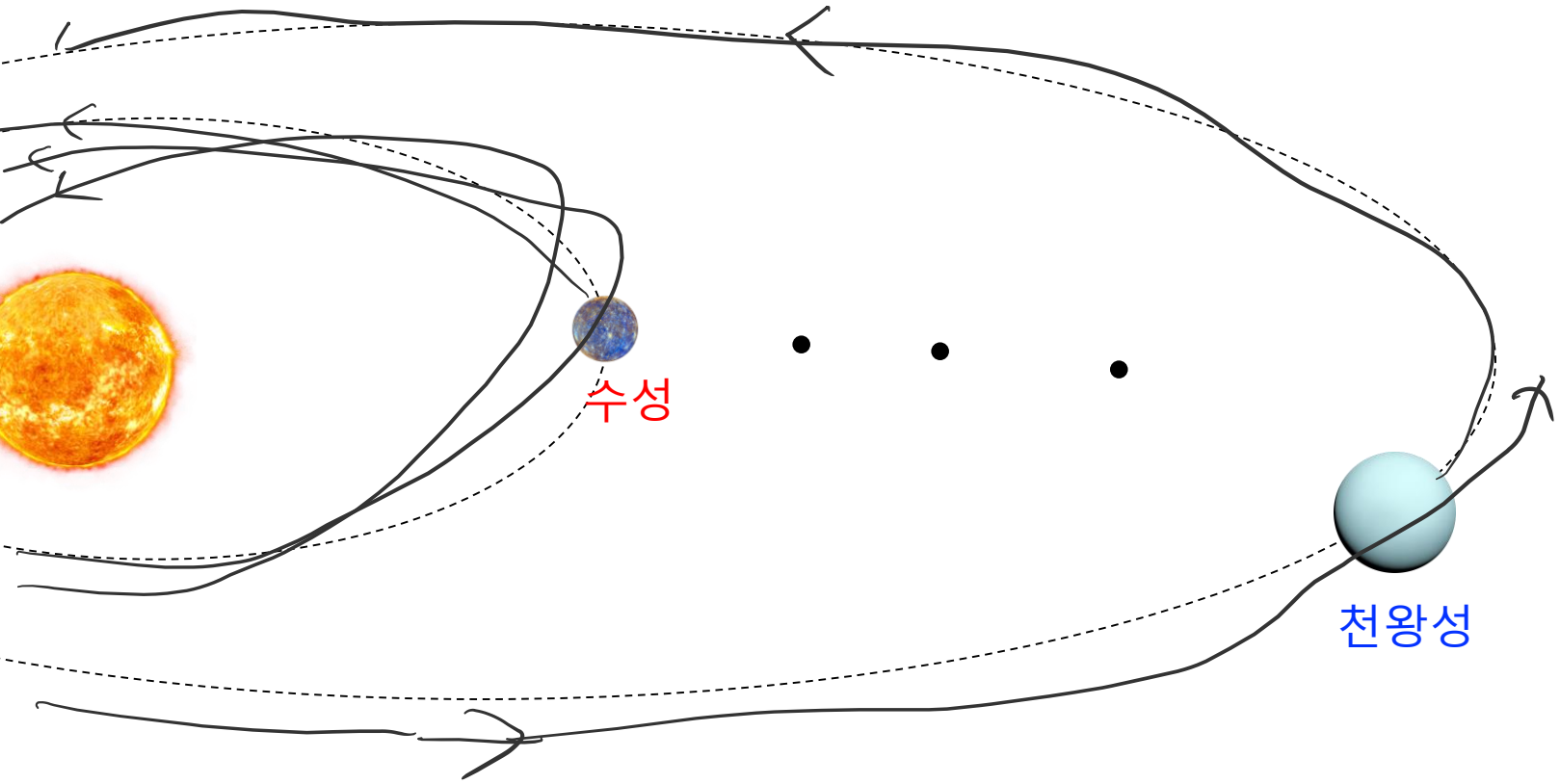
예) 수성과 천왕성의 불규칙적인 움직임

뉴턴의 만유인력법칙이 지배하던 시기, 대표적으로 수성과 천왕성의 움직임은 $F_g \propto -1/r^2$ 으로 예상되는 타원궤도에서 벗어난 모습을 보였다.



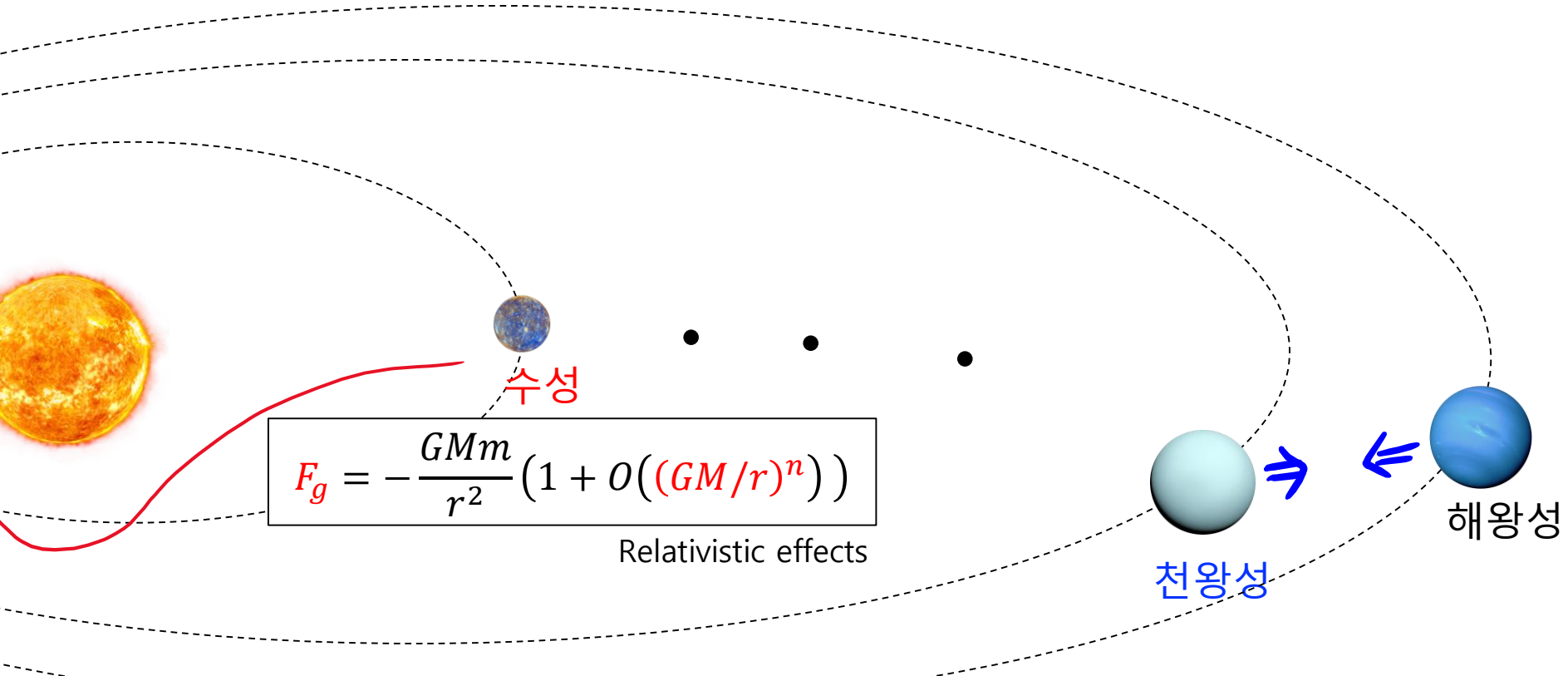
예) 수성과 천왕성의 불규칙적인 움직임

뉴턴의 만유인력법칙이 지배하던 시기, 대표적으로 수성과 천왕성의 움직임은 $F_g \propto -1/r^2$ 으로 예상되는 타원궤도에서 벗어난 모습을 보였다.



예) 수성과 천왕성의 불규칙적인 움직임

뉴턴의 만유인력법칙이 지배하던 시기, 대표적으로 수성과 천왕성의 움직임은 $F_g \propto -1/r^2$ 으로 예상되는 타원궤도에서 벗어난 모습을 보였다.



이 문제는 수성의 움직임은 뉴턴법칙의 수정(일반상대론)으로, 천왕성의 움직임은 천왕성 너머 새로운 보이지 않던 행성(해왕성)의 존재로 해결된다.

기존의 이해를 넘어서는 현상에 대해

앞의 예처럼

기존의 이론으로 설명할 수 없는 어떤 현상을 설명하기 위해 ① 당시에는 직접 **보이지 않는 물질**(해왕성)을 도입할 수도 있고, ② 기존의 중력의 **법칙이 수정**(뉴턴의 만유인력법칙→일반상대성이론)이 되어야 할 수도 있다.

기존의 이해를 넘어서는 현상에 대해

앞의 예처럼

기존의 이론으로 설명할 수 없는 어떤 현상을 설명하기 위해 ① 당시에는 직접 **보이지 않는 물질**(해왕성)을 도입할 수도 있고, ② 기존의 중력의 **법칙이 수정**(뉴턴의 만유인력법칙→일반상대성이론)이 되어야 할 수도 있다.

앞으로 다룰 암흑물질의 아이디어는 기본적으로 전자의 접근 방법을 택한 것이지만, 우리는 이미 **기본 입자 및 그들의 상호작용에 대한 법칙(표준모형)** 즉 물질의 종류에 대한 "법칙"을 가지고 있기 때문에 두 접근 방법 사이에 구분이 다소 모호하다.

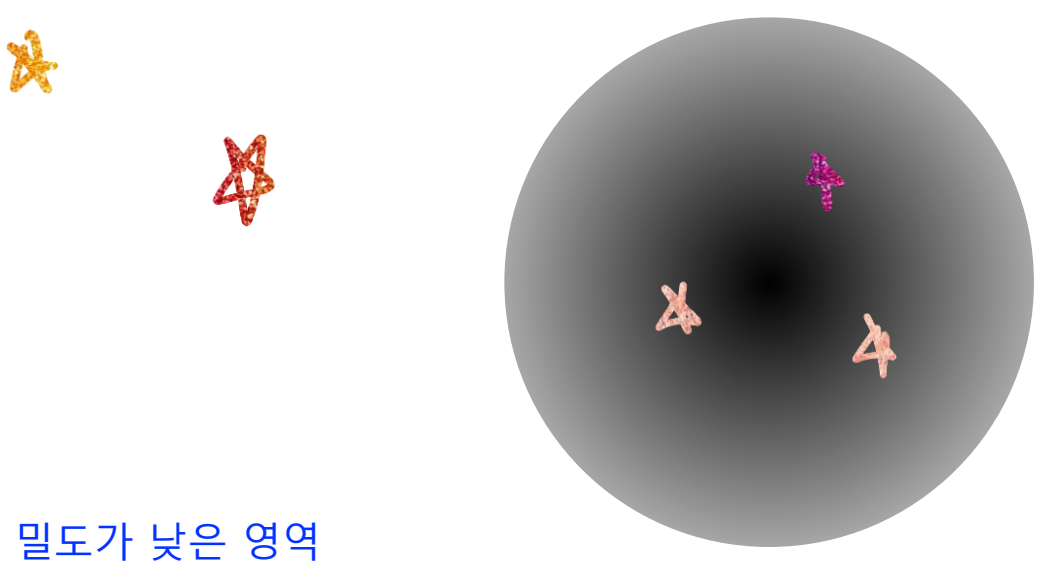
예1) 해왕성은 표준모형의 기본입자(양성자, 중성자, 전자, 빛)로 충분히 잘 설명되는 물질이다

예2) 우리가 다룰 암흑물질은 표준모형의 기본입자로 설명할 수 없는 물질이고 따라서 **표준모형 너머 물리법칙(BSM: Beyond the Standard Model)에 대한 탐구가 동반**되어야 한다.

우주의 질량 분포 탐구

우주에서 질량이 어디에 얼마나 모여 있는가?

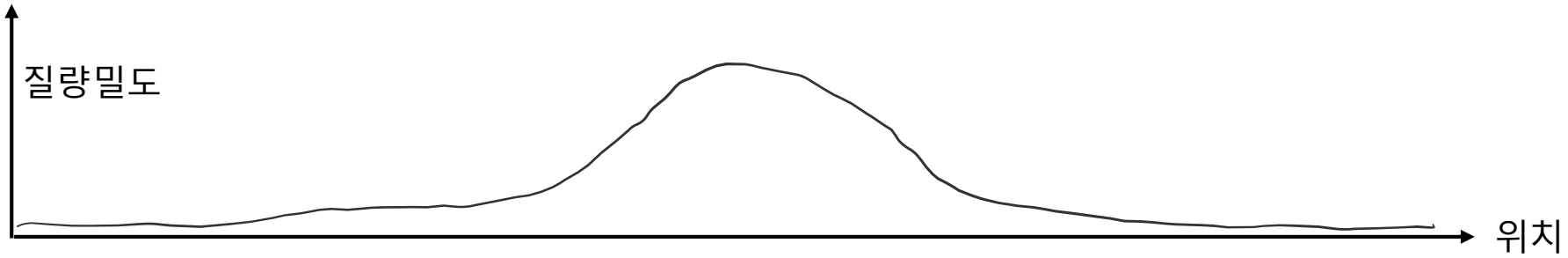
우주를 이루는 구성성분의 질량 및 에너지에 대한 정보는 중력법칙을 활용하여 구할 수 있다.



밀도가 낮은 영역

밀도가 높은 지역

밀도가 낮은 영역

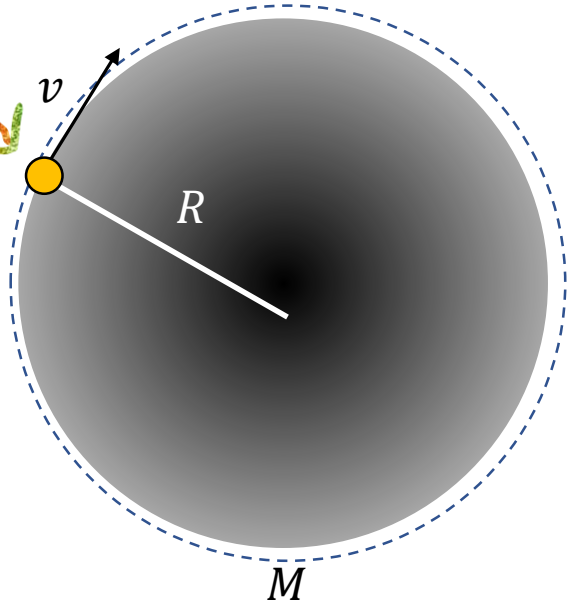


중력 질량

(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

$$\frac{mv^2}{r} \simeq \frac{GMm}{r^2} \Rightarrow M \simeq \frac{rv^2}{G}$$

별, 은하,
가스 (원자, 플라즈마)



은하회전곡선



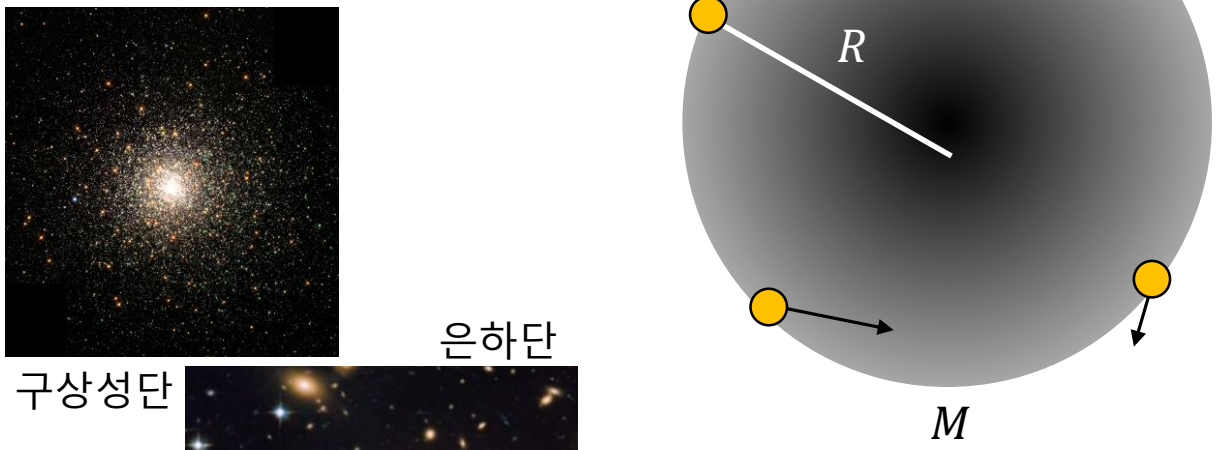
나선은하

중력 질량

(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

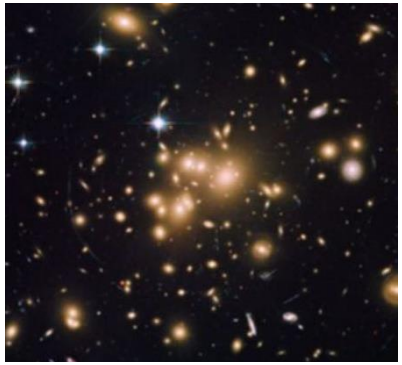
$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2,\ U_i = -\sum_j \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}, \qquad K = \sum K_i\,, U = \sum_i U_i$$

별, 은하,
가스 (원자, 플라즈마)



구상성단

은하단

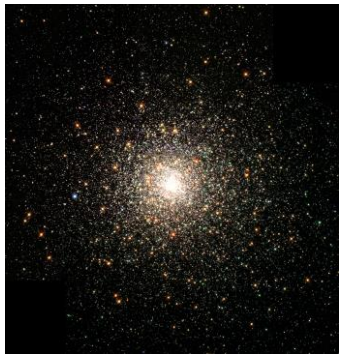


중력 질량

(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

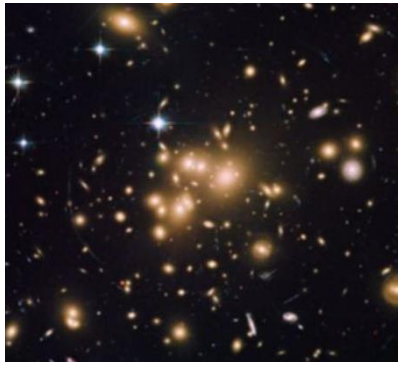
$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2,\ U_i = -\sum_j \frac{G m_i m_j}{r_{ij}}, \qquad K = \sum K_i\,, U = \sum_i U_i$$

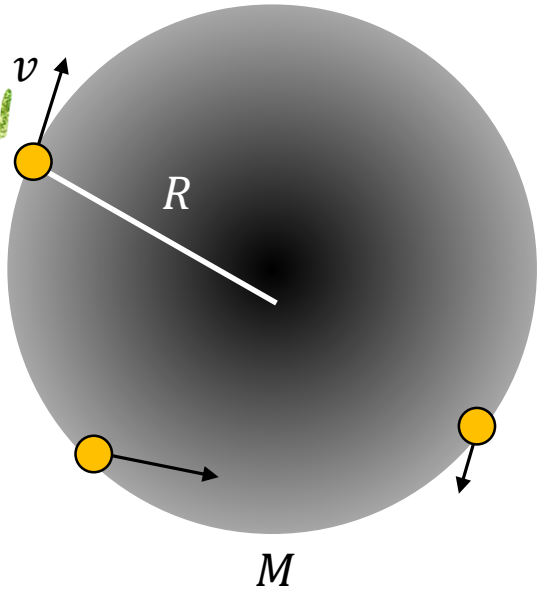
별, 은하,
가스 (원자, 플라즈마)



구상성단

은하단





$\langle v^2 \rangle$ 속도의 분산관계

$$\langle K \rangle = -\frac{1}{2}\langle U \rangle \sim \frac{GM^2}{2R}$$

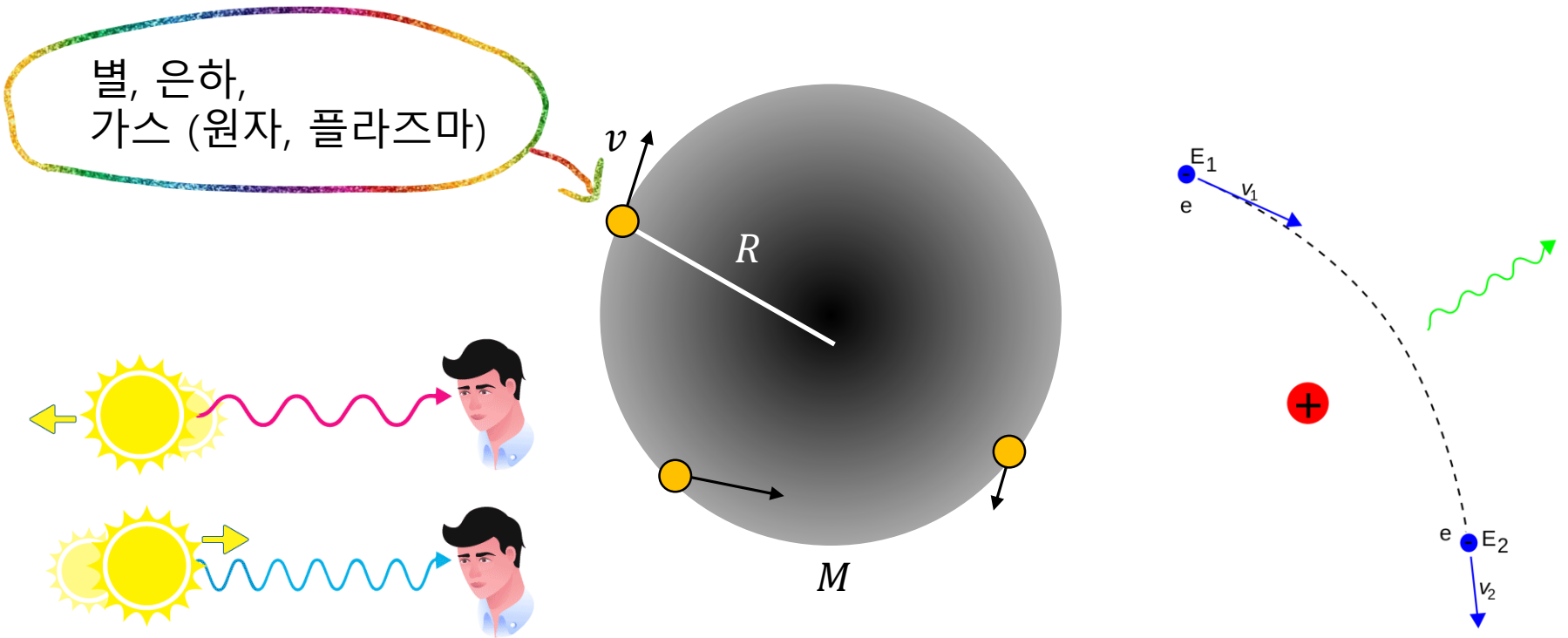
$$\langle K_i \rangle = \frac{1}{2} m_i \langle v^2 \rangle = -\frac{1}{2}\langle U_i \rangle \sim \frac{GMm_i}{2R}$$

비리얼 정리 (virial theorem):

중력에 의해 묶여 오랫동안 운동하는 입자(물체, 천체)들의 운동에너지의 평균값은 퍼텐셜 에너지 평균값의 반이 된다.

중력 질량

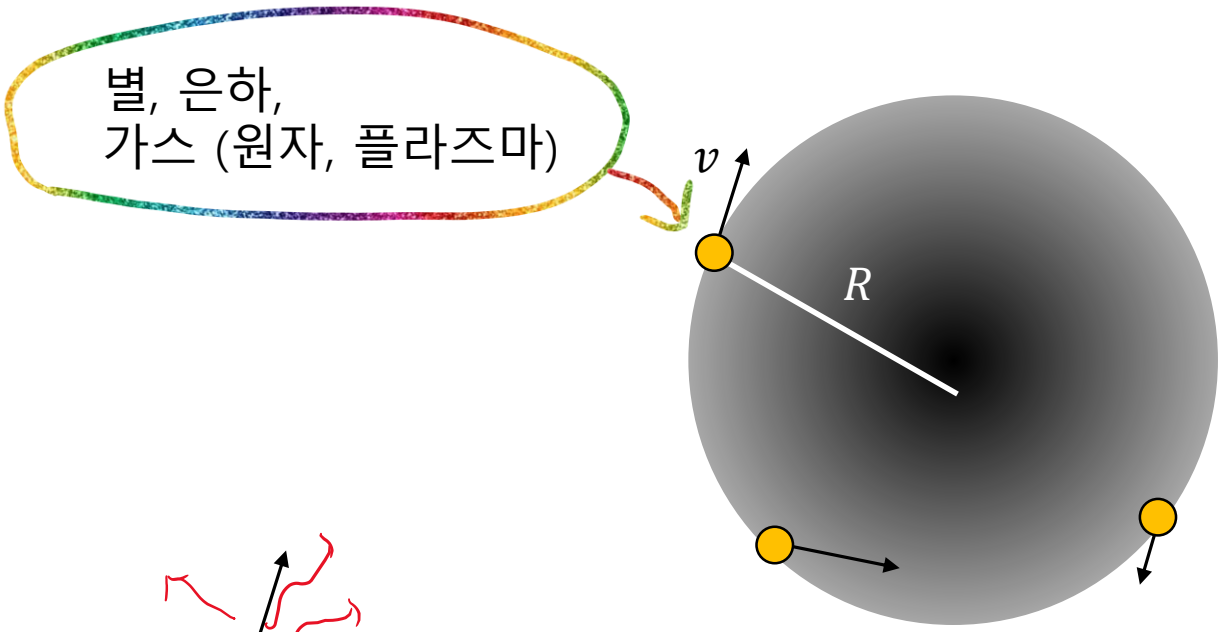
(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

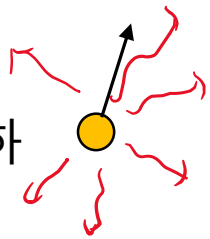


물체 ● 의 속도는 도플러 효과(Doppler Effect), 브렘스슈트랄룽 효과(Bremsstrahlung Effect) 등을 활용하여 물체가 방출하는 빛의 파장을 통해 방출시의 속도를 유추할 수 있다 → 중력질량 계산

중력 질량

(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

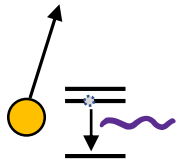




별, 은하

Red, blue shifted
optical EM wave





중성수소

Red, blue shifted
transition line signals





플라즈마

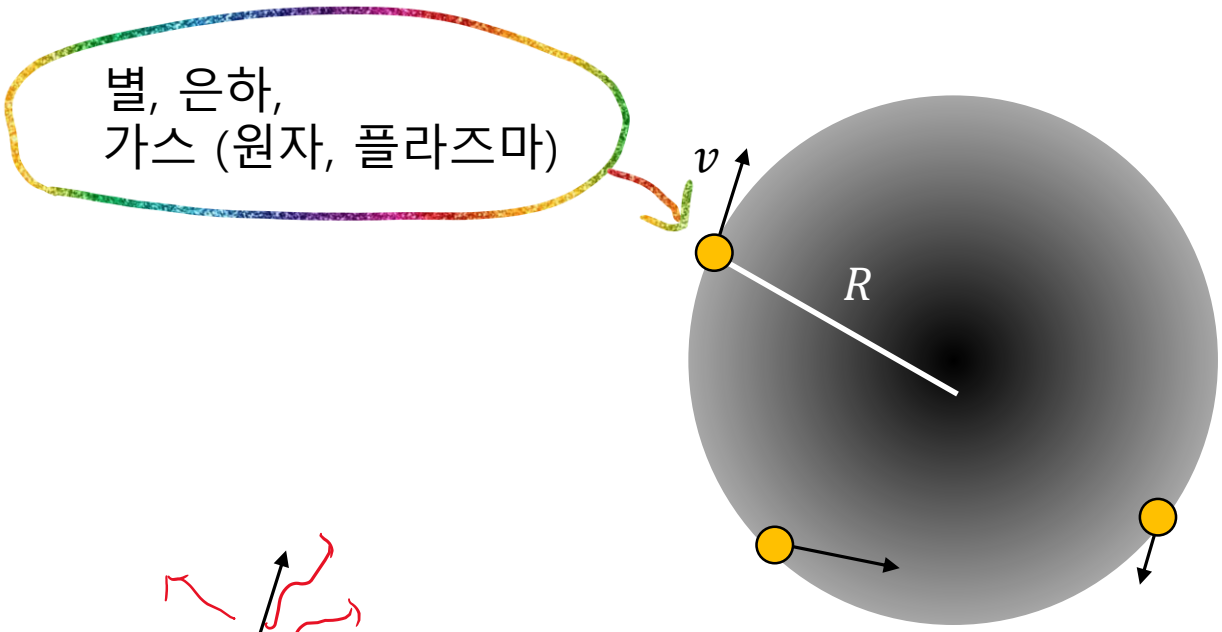
(Red, blue shifted) X-rays

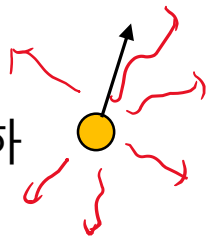
$$\frac{1}{2}m_p v^2 \sim \frac{3}{2}k_B T \sim \hbar\omega$$

중력 질량

(1) 큰 질량 → 큰 중력 → 묶여 있는 주변 물체의 큰 가속도 → 큰 속도 → 평형 상태

물체의 속도 분포 → 중력의 크기 → 질량의 분포

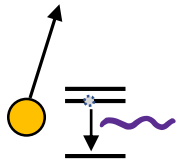




별, 은하

Red, blue shifted
optical EM wave





중성수소

Red, blue shifted
transition line signals





플라즈마

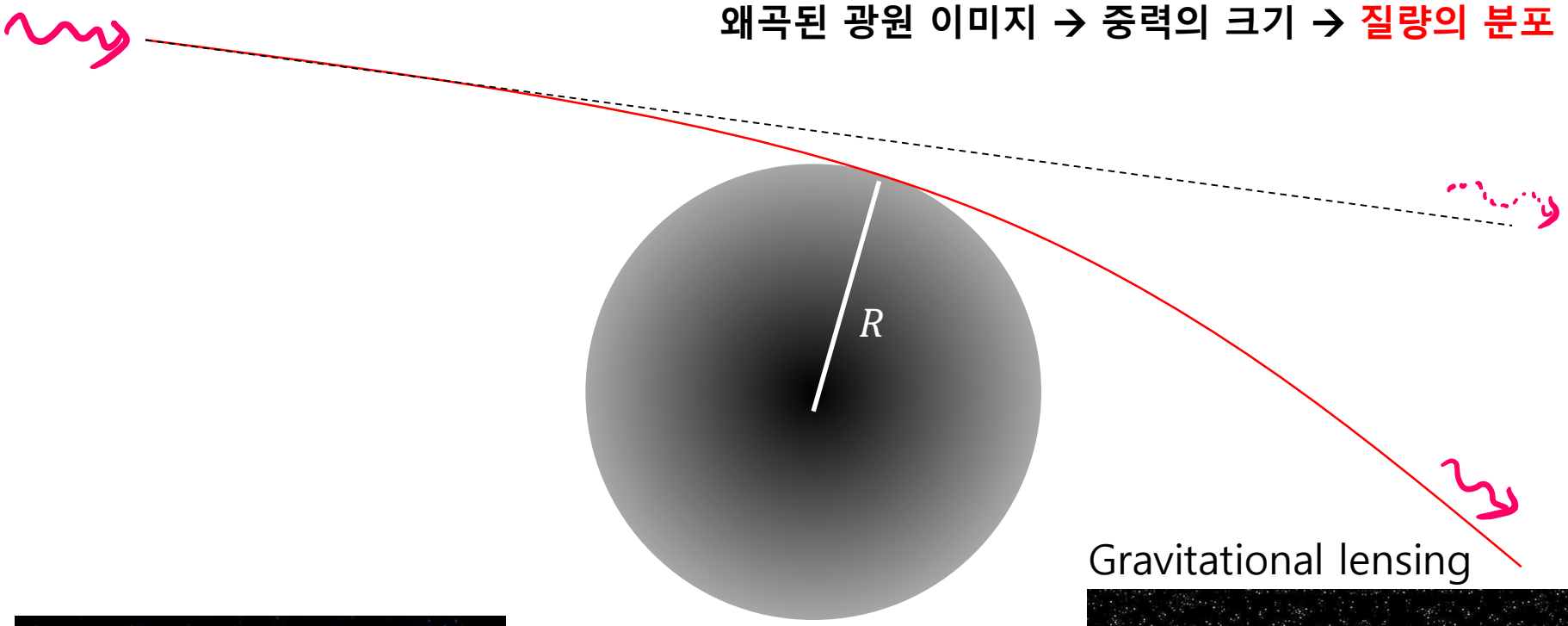
(Red, blue shifted) X-rays

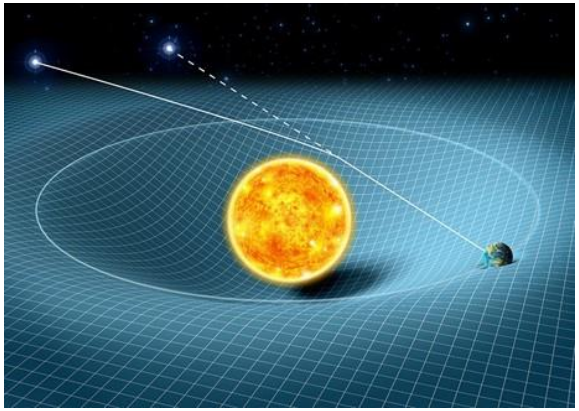
$$\frac{1}{2}m_p v^2 \sim \frac{3}{2}k_B T \sim \hbar\omega$$

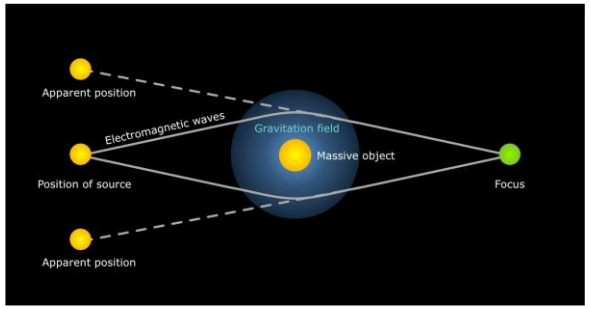
내부의 질량과 규모가 매우 큰 경우

(2) 큰 질량 → 큰 중력 → 주변 공간의 왜곡 (일반상대론) → 지나가는 빛의 경로가 휘어짐

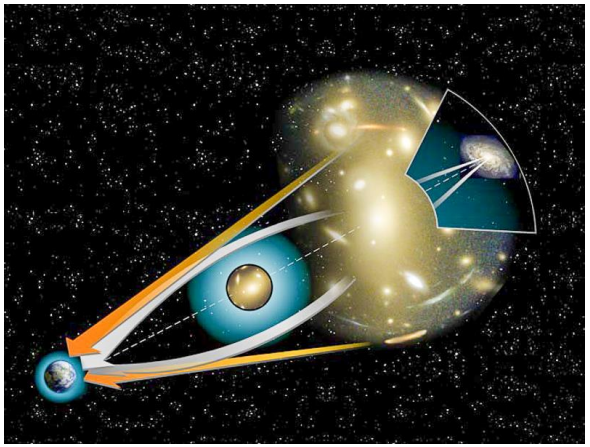
왜곡된 광원 이미지 → 중력의 크기 → 질량의 분포







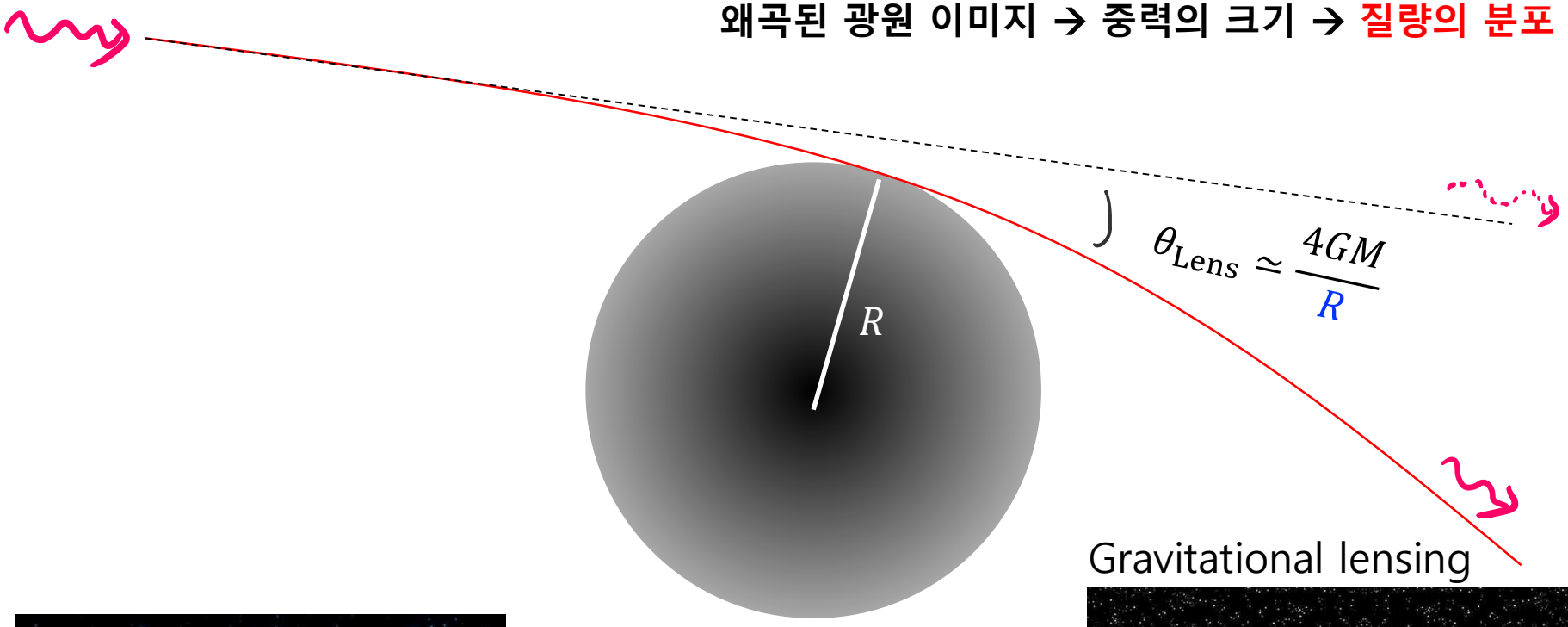
Gravitational lensing

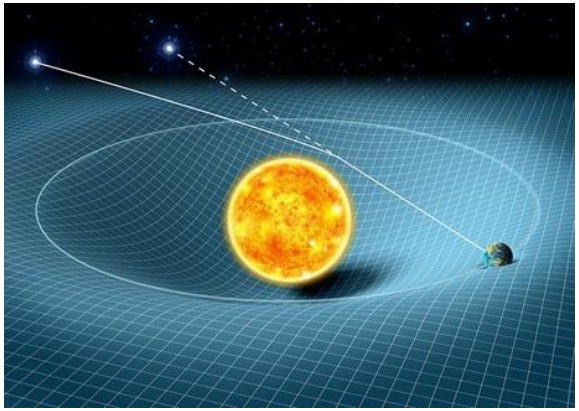


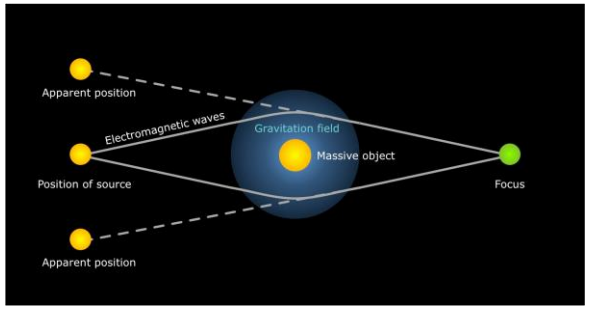
렌즈 질량

(2) 큰 질량 → 큰 중력 → 주변 공간의 왜곡 (일반상대론) → 지나가는 빛의 경로가 휘어짐

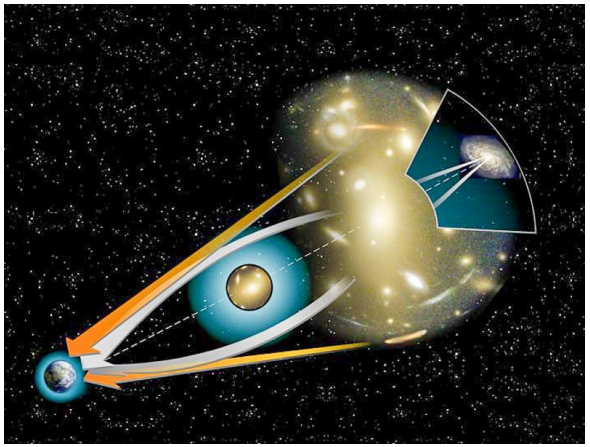
왜곡된 광원 이미지 → 중력의 크기 → 질량의 분포







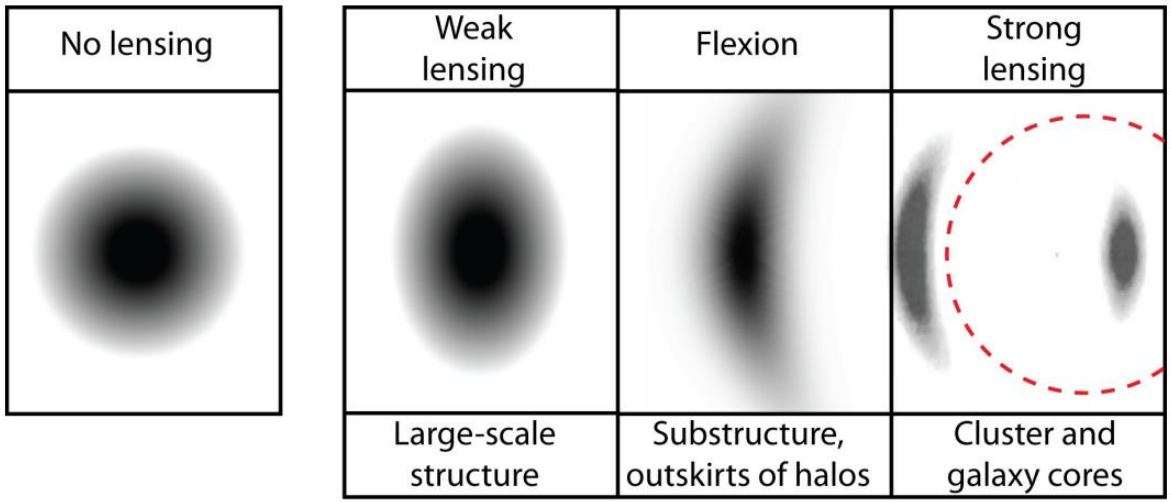
Gravitational lensing



렌즈 질량

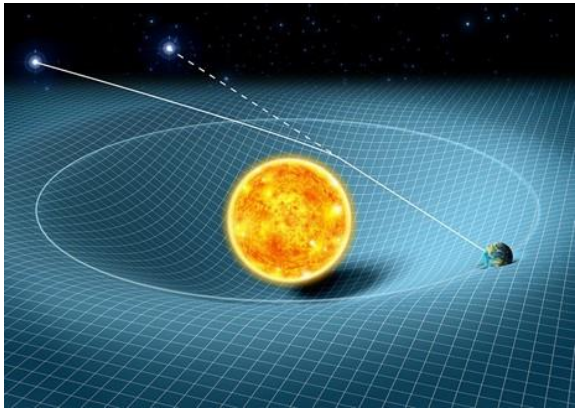
(2) 큰 질량 → 큰 중력 → 주변 공간의 왜곡 (일반상대론) → 지나가는 빛의 경로가 휘어짐

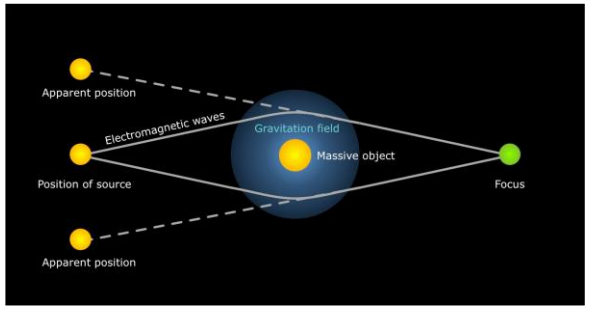
왜곡된 광원 이미지 → 중력의 크기 → 질량의 분포



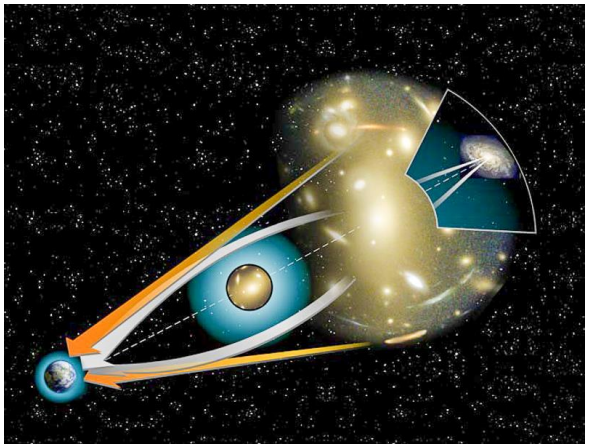
$$\theta_{\mathrm{Lens}} \simeq \frac{4GM}{R}$$

M





Gravitational lensing

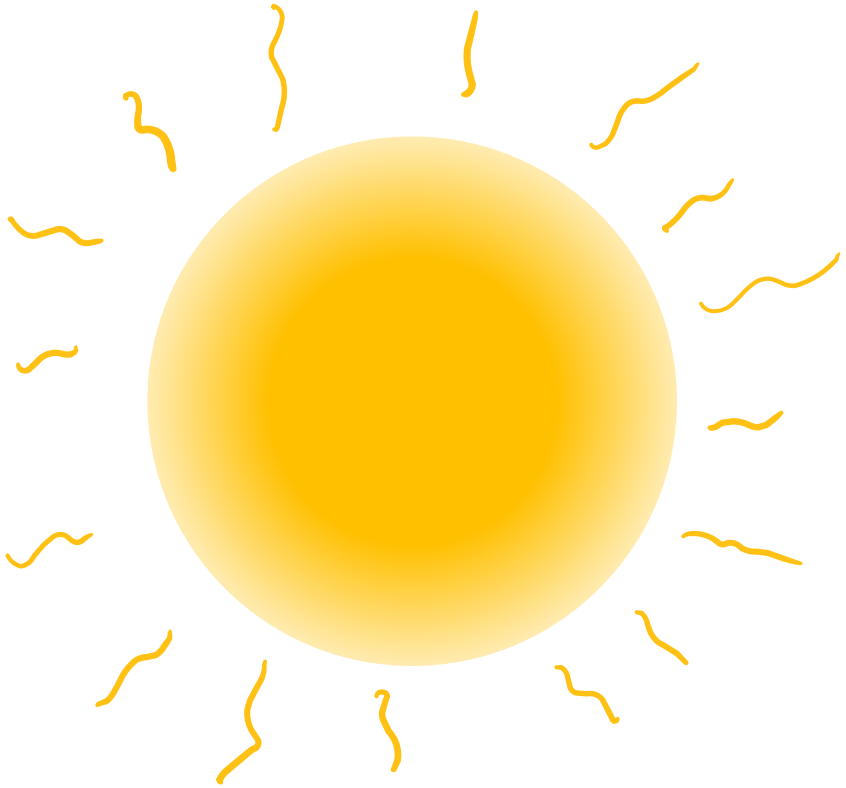


광도 질량

(2) 별(주계열성)의 밝기와 질량의 관계 : 은하는 수많은 별들을 포함하고 있고 이들의 **질량을 밝기(광도)로부터 추론**할 수 있다.



$\{\text{질량}, \text{광도}\} = \{M_\odot , L_\odot\}$



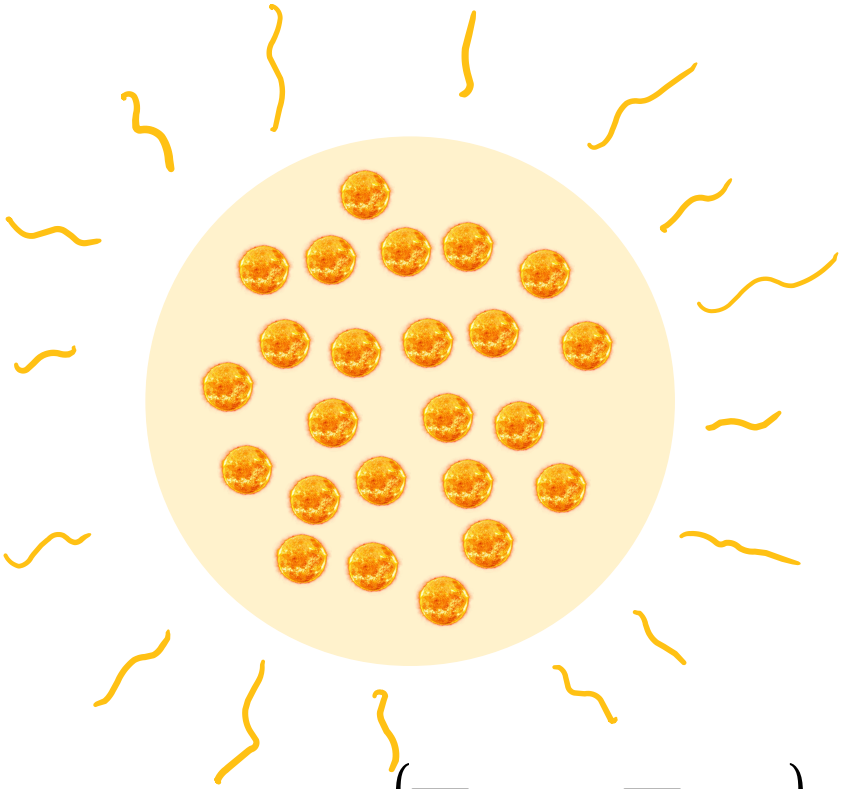
$\{M_L, L\}$

광도 질량

(2) 별(주계열성)의 밝기와 질량의 관계 : 은하는 수많은 별들을 포함하고 있고 이들의 **질량을 밝기(광도)로부터 추론**할 수 있다.



$\{\text{질량}, \text{광도}\} = \{M_\odot , L_\odot\}$



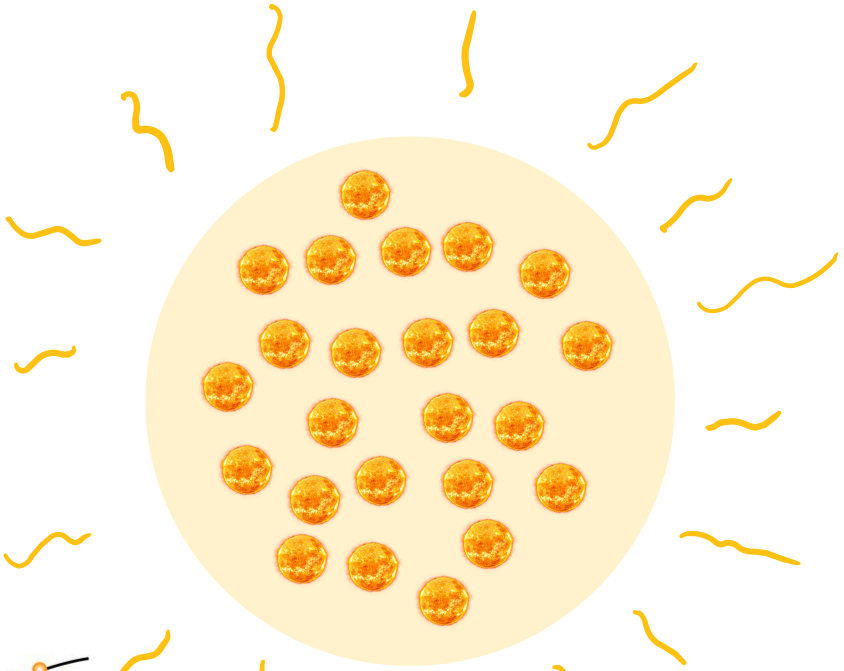
$$\{M_L, L\} = \left\{\sum_i M_{\text{star}} , \sum_i L_{\text{star}}\right\}$$

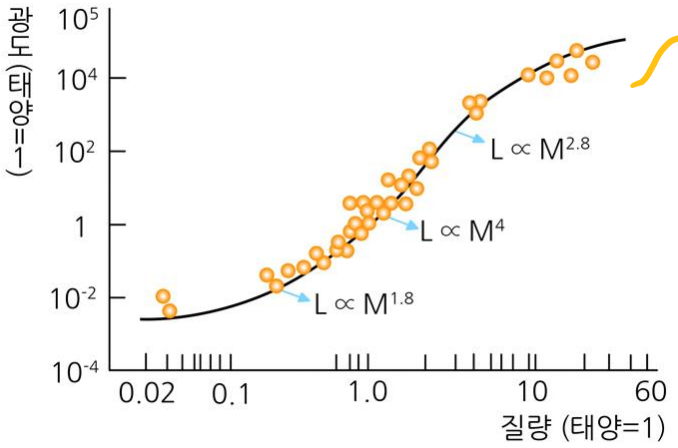
광도 질량

(3) 별(주계열성)의 밝기와 질량의 관계 : 은하는 수많은 별들을 포함하고 있고 이들의 **질량을 밝기(광도)로부터 추론**할 수 있다.



$\{\text{질량}, \text{광도}\} = \{M_\odot , L_\odot\}$

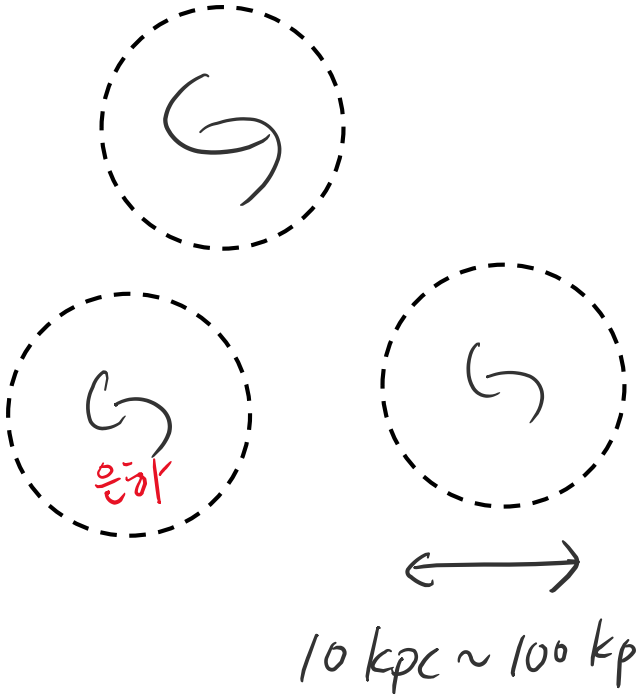


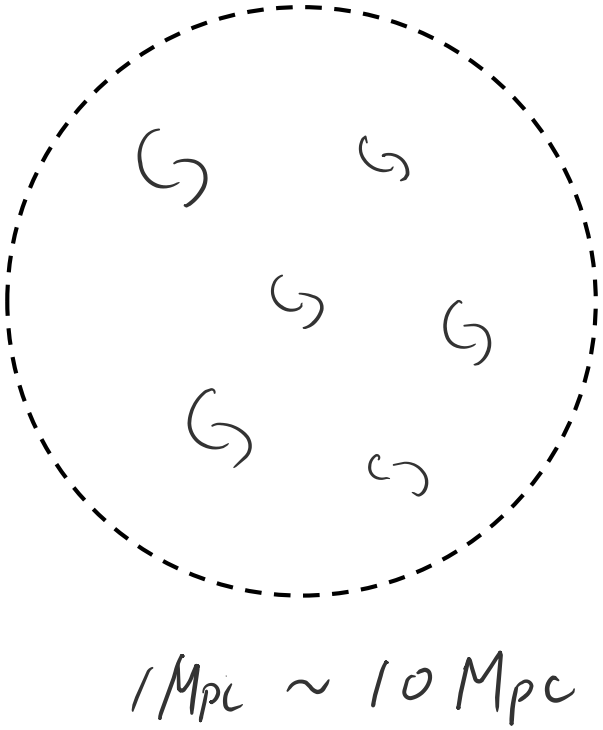


$$\{M_L, L\} = \left\{\sum_i M_{\text{star}} , \sum_i L_{\text{star}}\right\}$$ 일반적으로 $$\frac{\boldsymbol{M_L}}{\boldsymbol{L}} \sim \frac{\boldsymbol{M_\odot}}{\boldsymbol{L_\odot}}$$

질량 비교하기

이렇게 다양한 방식으로 측정한 질량을 은하, 은하단 등으로 스케일을 넓히면서 비교해볼 수 있다.





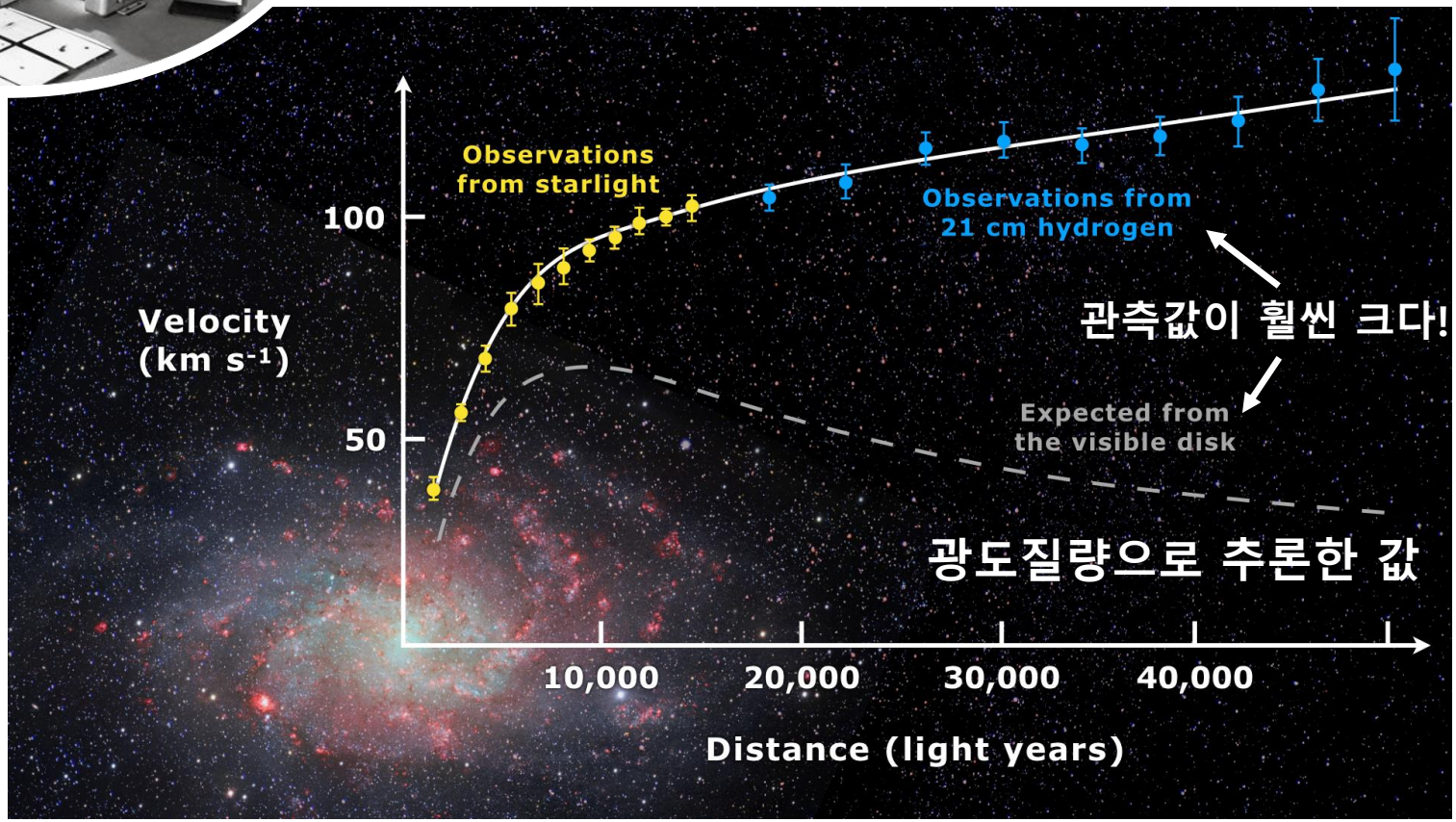
$$1\text{pc} \simeq 3.26\ \text{ly (light years)} = 3.26 \times (3.00 \times 10^5 \text{km/sec}) \times (3.154 \times 10^7 \text{sec})$$
$$\simeq 3.09 \times 10^{13} \text{km}$$

e.g. $R_\odot \simeq 7 \times 10^5 \text{km}$, $R_\oplus \simeq 6.4 \times 10^3 \text{km}$, $R_{\text{moon}} \simeq 1.7 \times 10^3 \text{km}$

은하 스케일



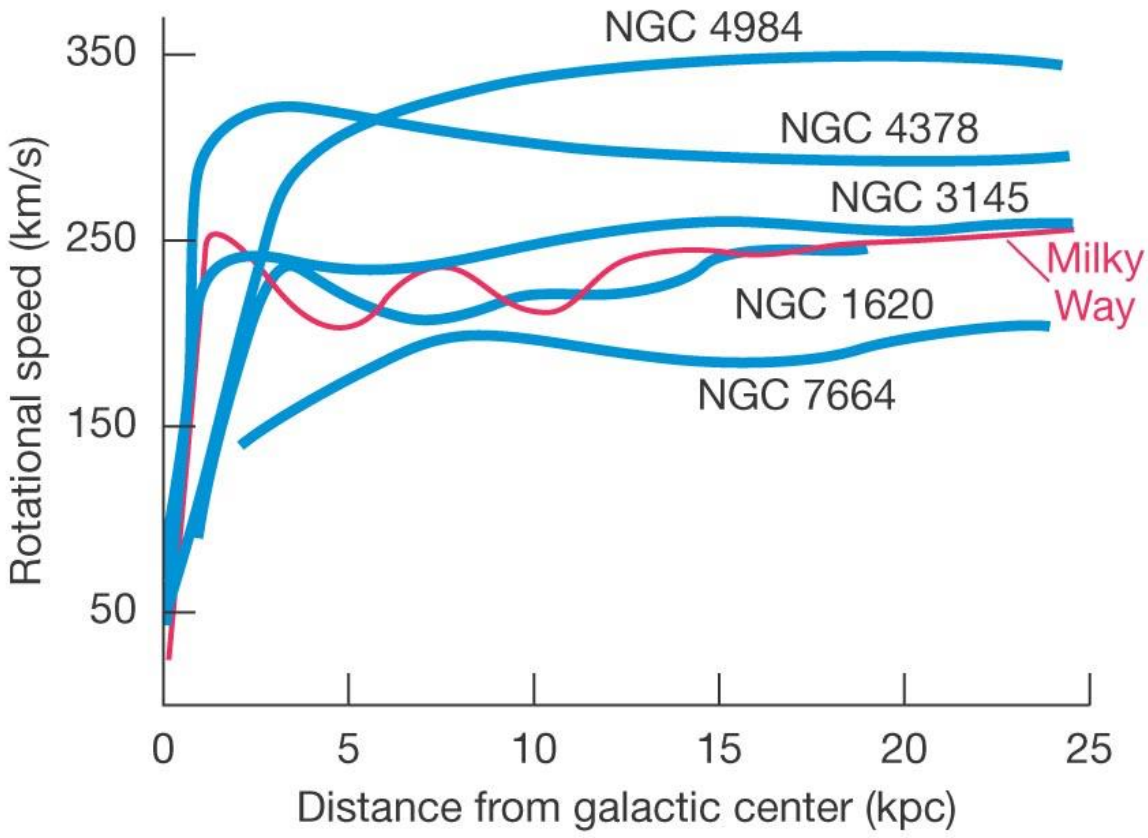
은하 주위를 도는 별(가스)의 회전 속도 $\propto \sqrt{\frac{\text{내부 중력질량}}{\text{중심에서의 거리}}}$



Galaxy, **Messier 33**

은하 스케일 : 중력질량 > 광도질량+가스질량

은하 주위를 도는 별(가스)의 회전 속도 $\propto \sqrt{\frac{\text{내부 중력질량}}{\text{중심에서의 거리}}}$



은하단 스케일

이렇게 다양한 방식으로 측정한 질량을 은하, 은하단 등으로 스케일을 넓히면서 비교해볼 수 있다.



Coma Galaxy Cluster
(Number of galaxies ~ 1000)

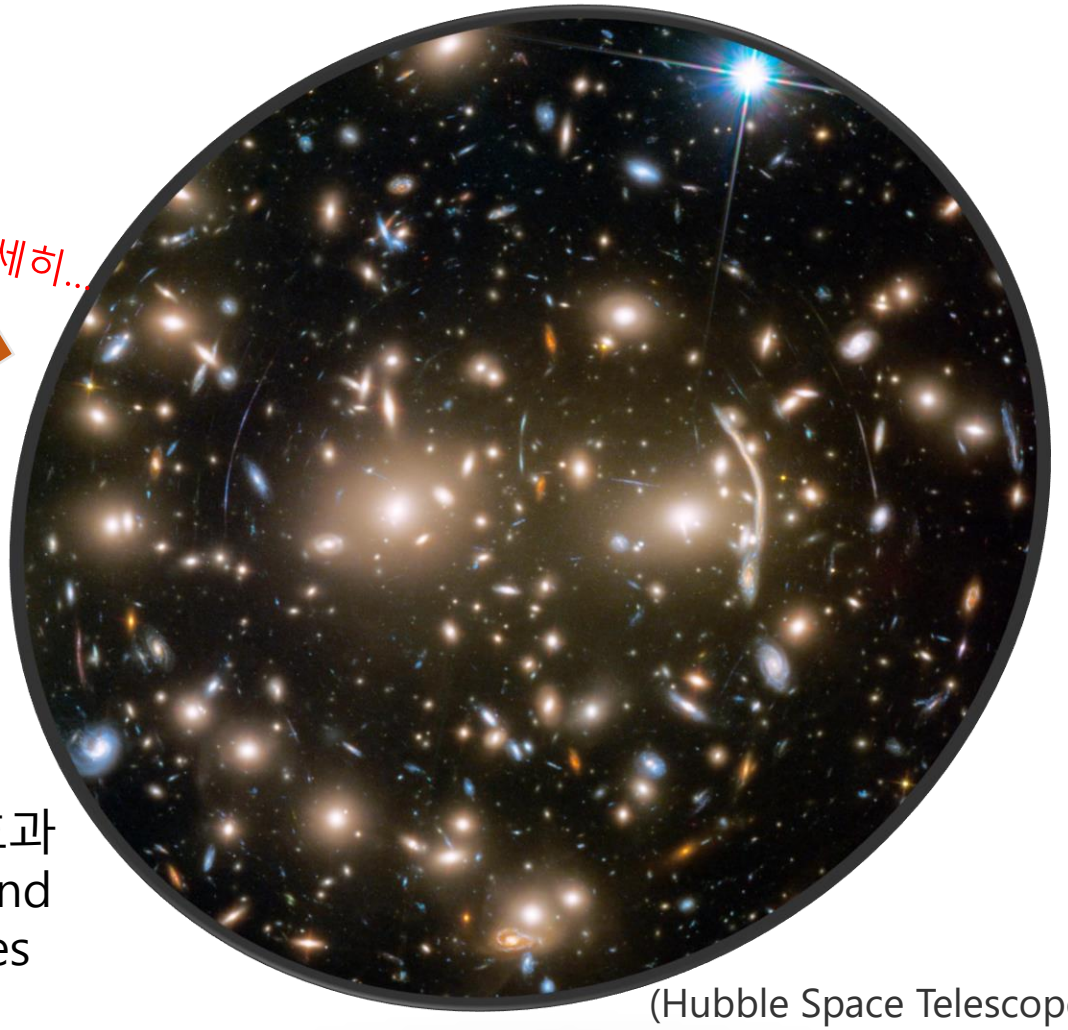
은하단 스케일

이렇게 다양한 방식으로 측정한 질량을 은하, 은하단 등으로 스케일을 넓히면서 비교해볼 수 있다.



Coma Galaxy Cluster
(Number of galaxies ~ 1000)

더 자세히...



중력렌즈효과
distorted and
arc images

(Hubble Space Telescope)

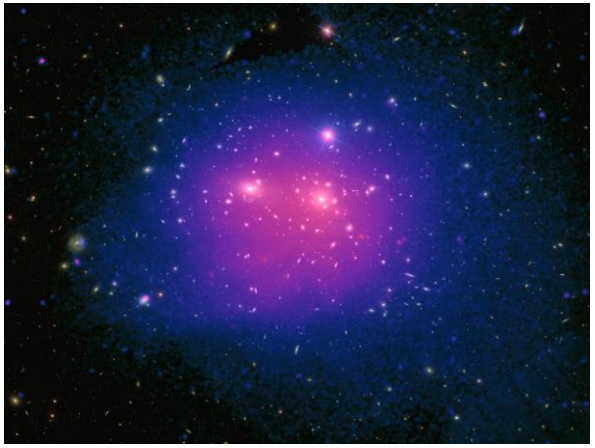
은하단 스케일 : 중력(렌즈)질량 > 광도질량 + 가스질량

이렇게 다양한 방식으로 측정한 질량을 은하, 은하단 등으로 스케일을 넓히면서 비교해볼 수 있다.



Optical ➔ 중력질량, 광도질량

$\langle v \rangle \sim 1000\ \mathrm{km/sec}$, $R_{\mathrm{cluster}} \sim 4\ \mathrm{Mpc}$

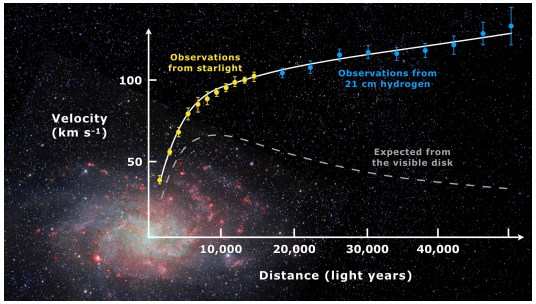


X-ray ($k_B T \sim 8\mathrm{keV}$) ➔ 중력질량, 가스질량

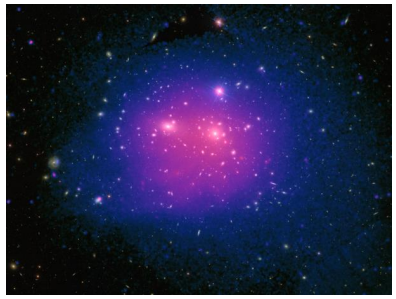
$$\frac{M}{L} \sim O(100)\frac{M_\odot}{L_\odot} \Rightarrow \quad M_{\mathrm{gravity}} \sim 10^{15} M_\odot \sim 100 M_{\mathrm{stars}}, \qquad M_{\mathrm{gas}} \sim (10-20) M_{\mathrm{stars}}$$

중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

이렇게 다양한 방식으로 측정한 질량을 은하, 은하단 등으로 스케일을 넓히면서 비교해볼 수 있다.



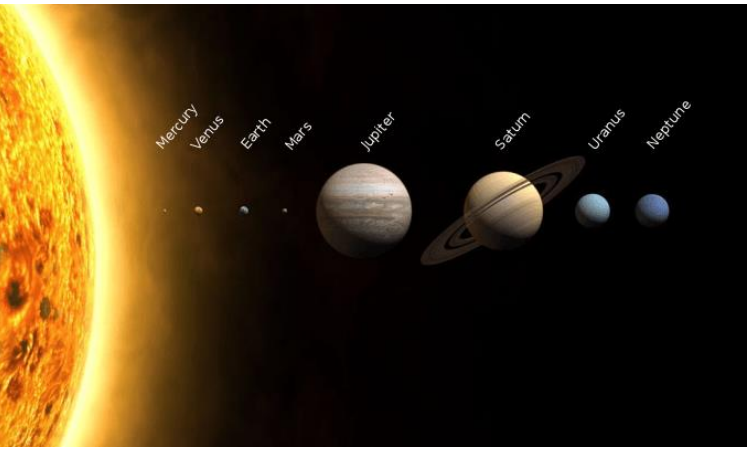


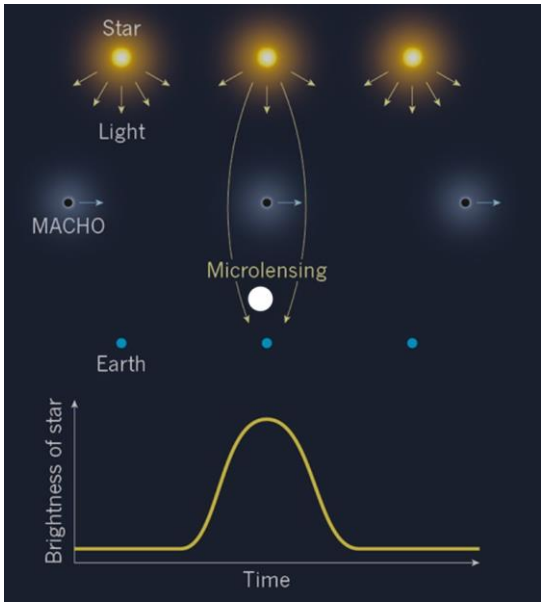


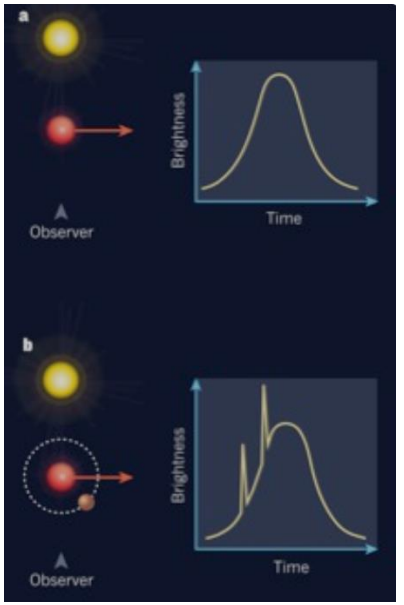
	나선은하	타원은하	은하그룹	은하단
M/L비	2~10	1~200	~180	~200

중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

별이나 가스 뿐만 아니라 행성이나 갈색왜성 등 어둡고 질량은 작지만 밀도가 높은 물질들에 대한 탐색 또한 이뤄졌다. 이를 MACHO(Massive Astrophysical Compact Halo Object)라 하고 마이크로 중력렌즈(micro gravitational lensing)효과 등을 통해서 탐색하고 있으나 이 또한 중력질량을 설명하기에 충분한 양은 아니었다.







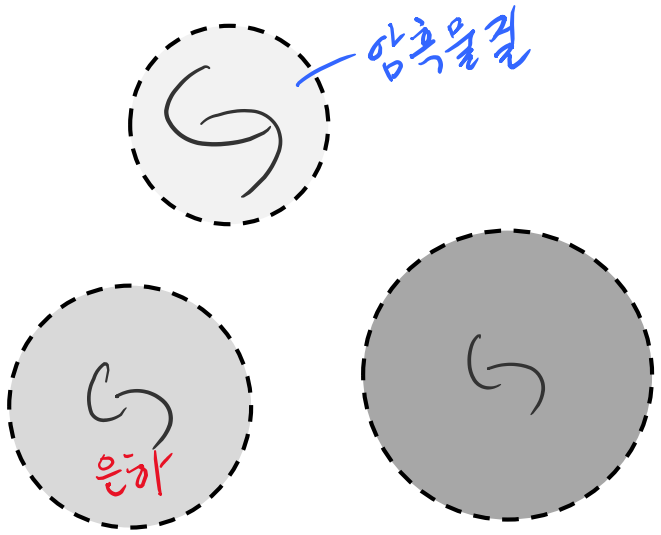
중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

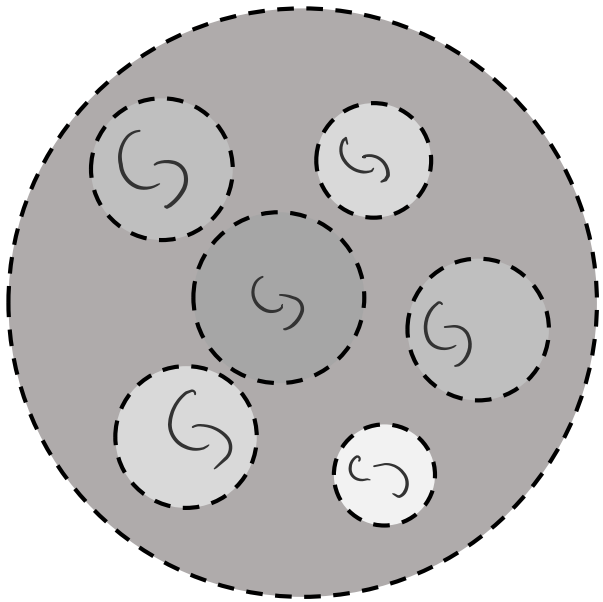
중력으로 인해 안정적으로 속박되어 있는 은하와 은하단 규모의 수많은 관측을 통해 이를 구성하는 별이나, 가스, 행성이나 갈색왜성 등의 질량을 다 합하더라도, 그 안에서 돌고 있는 별이나 가스, 은하의 빠른 속도를 설명하기에는 너무 부족하고 또한 주변을 지나가는 빛을 충분히 휘어지게 할 정도의 강한 중력을 제공하기에도 턱없이 부족함이 밝혀졌다 : **질량 손실 문제**

중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

중력으로 인해 안정적으로 속박되어 있는 은하와 은하단 규모의 수많은 관측을 통해 이를 구성하는 별이나, 가스, 행성이나 갈색왜성 등의 질량을 다 합하더라도, 그 안에서 돌고 있는 별이나 가스, 은하의 빠른 속도를 설명하기에는 너무 부족하고 또한 주변을 지나가는 빛을 충분히 휘어지게 할 정도의 강한 중력을 제공하기에도 턱없이 부족함이 밝혀졌다 : **질량 손실 문제**

해당 이상현상은 은하와 은하단 각각의 독립된 문제가 아니라 **하나의 원인**으로 발생했다고 본다. 이는 빛을 내거나 반사를 하지 않고 큰 규모에서 중력으로 상호작용을 하는 모종의 물질인 소위 **암흑물질**이 은하를 감싸고 있고, 또한 은하단을 감싸고 있다는 것이다.





중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

중력으로 인해 안정적으로 속박되어 있는 은하와 은하단 규모의 수많은 관측을 통해 이를 구성하는 별이나, 가스, 행성이나 갈색왜성 등의 질량을 다 합하더라도, 그 안에서 돌고 있는 별이나 가스, 은하의 빠른 속도를 설명하기에는 너무 부족하고 또한 주변을 지나가는 빛을 충분히 휘어지게 할 정도의 강한 중력을 제공하기에도 턱없이 부족함이 밝혀졌다 : **질량 손실 문제**

해당 이상현상은 은하와 은하단 각각의 독립된 문제가 아니라 **하나의 원인**으로 발생했다고 본다. 이는 빛을 내거나 반사를 하지 않고 큰 규모에서 중력으로 상호작용을 하는 모종의 물질인 소위 **암흑물질**이 은하를 감싸고 있고, 또한 은하단을 감싸고 있다는 것이다.

만약에 **암흑물질이 자연에 존재하고, 보이는 물질보다 더 양이 많다면** 우주가 진화하는 과정에서 암흑물질이 자체 중력에 의해 먼저 속박된 상태(Dark Halo)를 이루고, 이 암흑 헤일로의 중력 포텐셜에 우리가 아는 물질(보이는 물질)이 끌려들어가면서 은하가 형성되고 은하단이 형성되는 것은 매우 자연스럽다.

중력(렌즈)질량 > 우리가 아는 물질로 이뤄진 질량

중력으로 인해 안정적으로 속박되어 있는 은하와 은하단 규모의 수많은 관측을 통해 이를 구성하는 별이나, 가스, 행성이나 갈색왜성 등의 질량을 다 합하더라도, 그 안에서 돌고 있는 별이나 가스, 은하의 빠른 속도를 설명하기에는 너무 부족하고 또한 주변을 지나가는 빛을 충분히 휘어지게 할 정도의 강한 중력을 제공하기에도 턱없이 부족함이 밝혀졌다 : **질량 손실 문제**

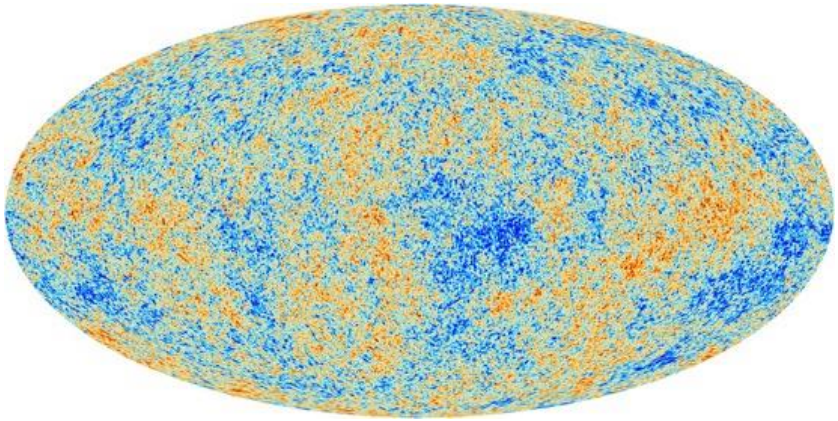
해당 이상현상은 은하와 은하단 각각의 독립된 문제가 아니라 **하나의 원인**으로 발생했다고 본다. 이는 빛을 내거나 반사를 하지 않고 큰 규모에서 중력으로 상호작용을 하는 모종의 물질인 소위 **암흑물질**이 은하를 감싸고 있고, 또한 은하단을 감싸고 있다는 것이다.

만약에 **암흑물질이 자연에 존재하고, 보이는 물질보다 더 양이 많다면** 우주가 진화하는 과정에서 암흑물질이 자체 중력에 의해 먼저 속박된 상태(Dark Halo)를 이루고, 이 암흑 헤일로의 중력 포텐셜에 우리가 아는 물질(보이는 물질)이 끌려들어가면서 은하가 형성되고 은하단이 형성되는 것은 매우 자연스럽다.

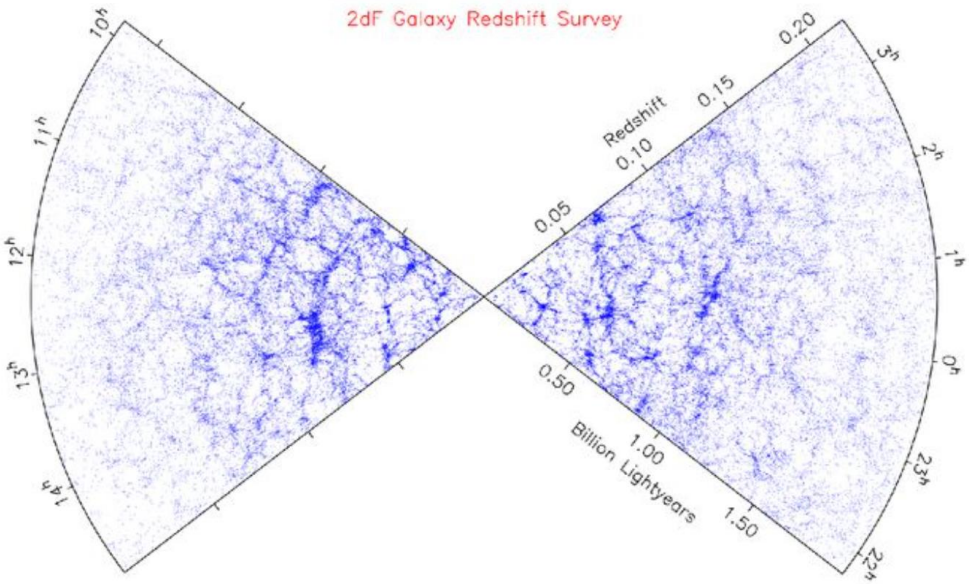
이러한 논리는 **우주의 진화 과정에서 암흑물질이 모종의 역할을 했을 것이고**, 암흑물질의 증거가 은하단보다 훨씬 더 큰 규모에서도 나타날 수 있다는, 즉 우주의 거대 구조와 과거를 이해하는데 필수적일 수 있음을 의미한다. ➔ 표준 우주론 (Lambda CDM 모델)

표준 우주론

암흑물질은 우주의 진화과정을 이해하는데 필수적인 역할을 한다. 여기서 우주란 우리가 볼 수 있는 과거와 현재 전체를 의미하며 이에 대한 것은 우주론 강의에서 더 다루기로 하자.



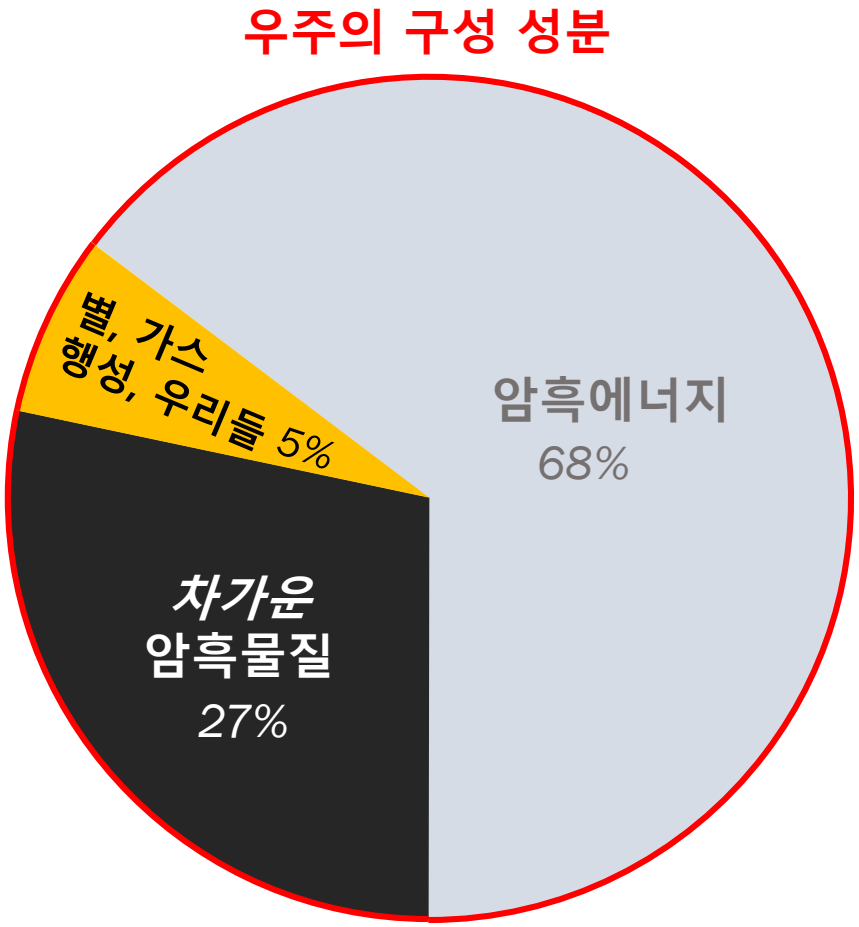
Cosmic Microwave Background (~10 Gpc)



Large Scale Structure of the Universe (0.1~1 Gpc)

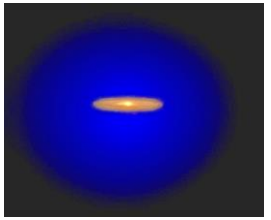
표준 우주론

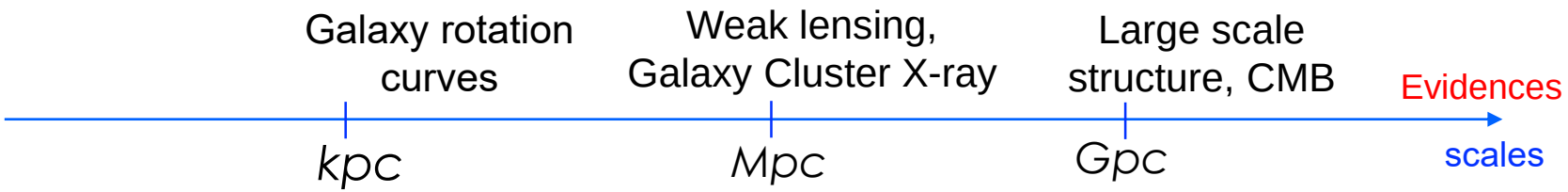
암흑물질은 우주의 진화과정을 이해하는데 필수적인 역할을 한다. 여기서 우주란 우리가 볼 수 있는 과거와 현재 전체를 의미하며 이에 대한 것은 우주론 강의에서 더 다루기로 하자.



암흑물질의 거시적인 특성

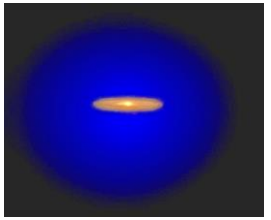
1. 중력으로 상호작용하고 쉽게 중력으로 뭉쳐서 구조를 만들 수 있다. (질량이 있고 차갑다)
2. 우주의 나이(13.7Gy)만큼이나 오래 존재한다. (매우 안정적이다)
3. 빛을 (거의) 방출하지 않고 반사하지도 않는다. (전자기 및 강한 상호작용을 (거의) 하지 않는다)
4. 은하의 암흑 헤일로는 구형이 가깝고 디스크 형태가 아니다. (에너지 손실이 적다)
5. 평균적으로 우주 에너지의 25-27% 를 차지한다. (보이는 물질의 4~5배)



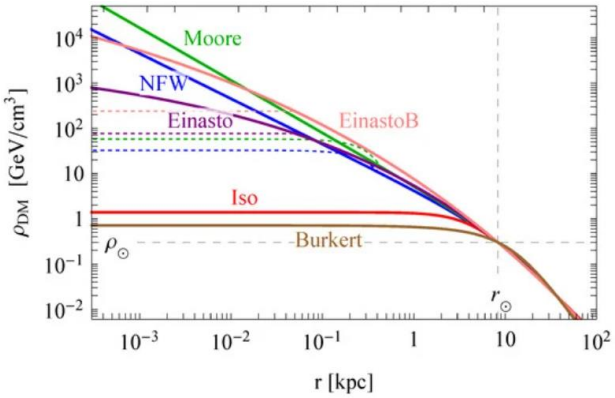


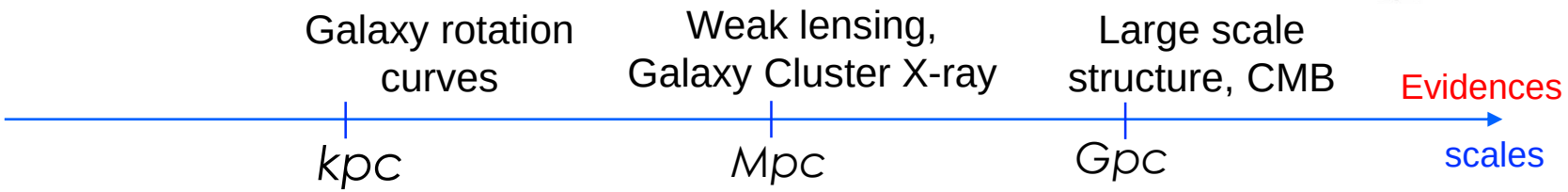
암흑물질의 거시적인 특성

1. 중력으로 상호작용하고 쉽게 중력으로 뭉쳐서 구조를 만들 수 있다. (질량이 있고 차갑다)
2. 우주의 나이(13.7Gy)만큼이나 오래 존재한다. (매우 안정적이다)
3. 빛을 (거의) 방출하지 않고 반사하지도 않는다. (전자기 및 강한 상호작용을 (거의) 하지 않는다)
4. 은하의 암흑 헤일로는 구형이 가깝고 디스크 형태가 아니다. (에너지 손실이 적다)
5. 평균적으로 우주 에너지의 25-27% 를 차지한다. (보이는 물질의 4~5배)
6. 태양계 주변의 암흑물질의 밀도는 $\boldsymbol{\rho_{\rm DM} = (0.3 - 0.4)\,\rm GeV/cm^3}$ 이다.



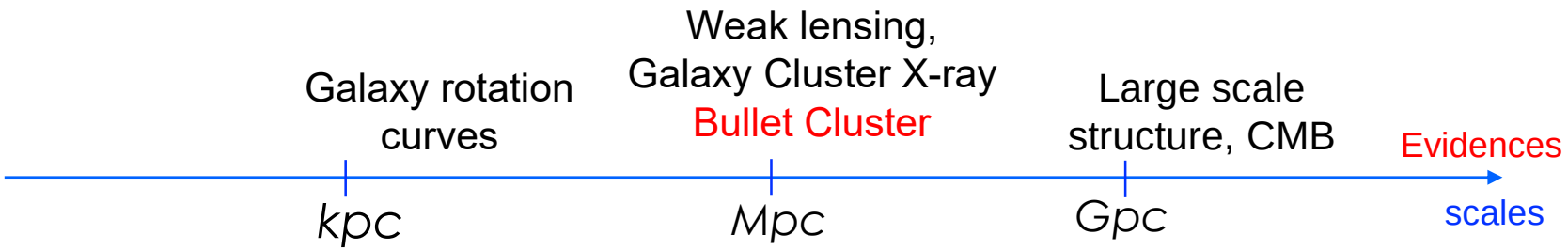
($\rm GeV = 1.8 \times 10^{-27} kg$, 양성자 질량 $m_p = 0.938\ \rm GeV$,
전자 질량 $m_e = 0.511\ \rm MeV \simeq 0.5 \times 10^{-3} m_p$,
태양 질량 $M_\odot = 1.99 \times 10^{30} \rm kg$, 지구 질량 $M_\oplus = 3.0 \times 10^{-6}\ M_\odot$,
우주 평균 암흑물질 밀도 $\bar{\rho}_{\rm DM} \simeq 1.2 \times 10^{-6}\ \rm GeV/cm^3$)



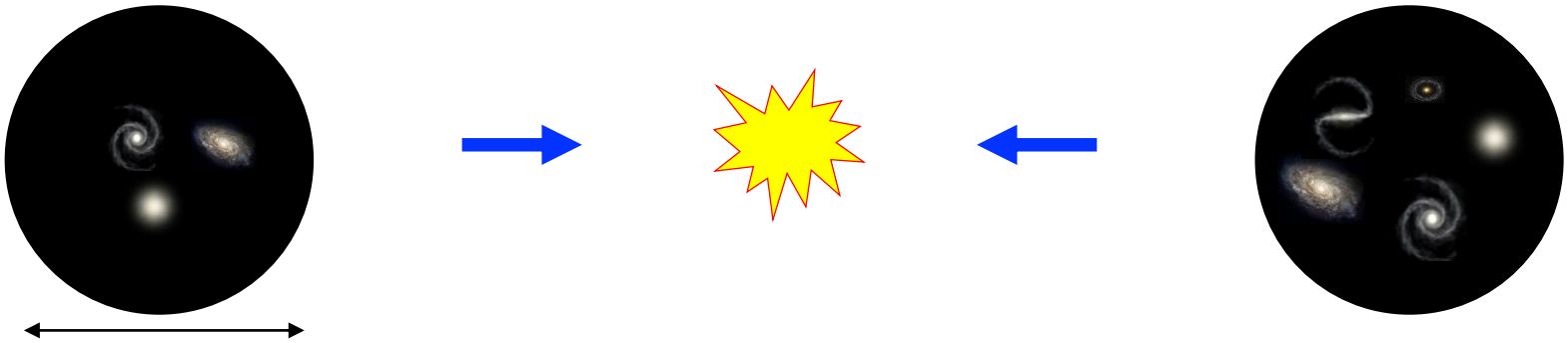


암흑물질의 거시적인 특성

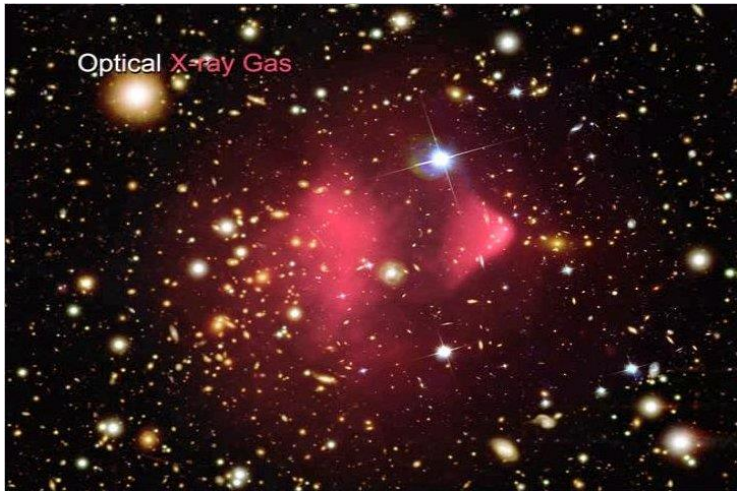
1. 중력으로 상호작용하고 쉽게 중력으로 뭉쳐서 구조를 만들 수 있다. (질량이 있고 차갑다)
2. 우주의 나이(13.7Gy)만큼이나 오래 존재한다. (매우 안정적이다)
3. 빛을 (거의) 방출하지 않고 반사하지도 않는다. (전자기 및 강한 상호작용을 (거의) 하지 않는다)
4. 은하의 암흑 헤일로는 구형이 가깝고 디스크 형태가 아니다. (에너지 손실이 적다)
5. 평균적으로 우주 에너지의 25-27% 를 차지한다. (보이는 물질의 4~5배)
6. 태양계 주변의 암흑물질의 밀도는 $\boldsymbol{\rho_{\mathrm{DM}} = (0.3 - 0.4)\mathrm{GeV/cm^3}}$ 이다.
7. 암흑물질과 보이는 물질, 그리고 암흑물질과 암흑물질 사이의 상호작용은 꽤 제약되어 있다.



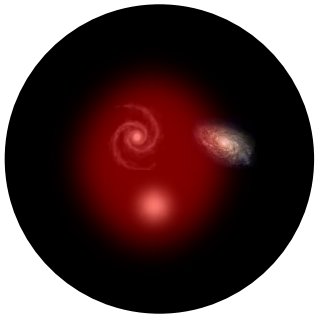
은하단과 은하단의 충돌



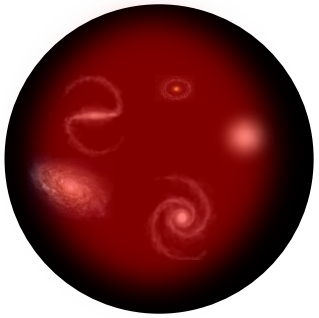
충돌 직후의 X-선 관측: 가스의 영역



강렬한 충돌 (Thomson Scattering)

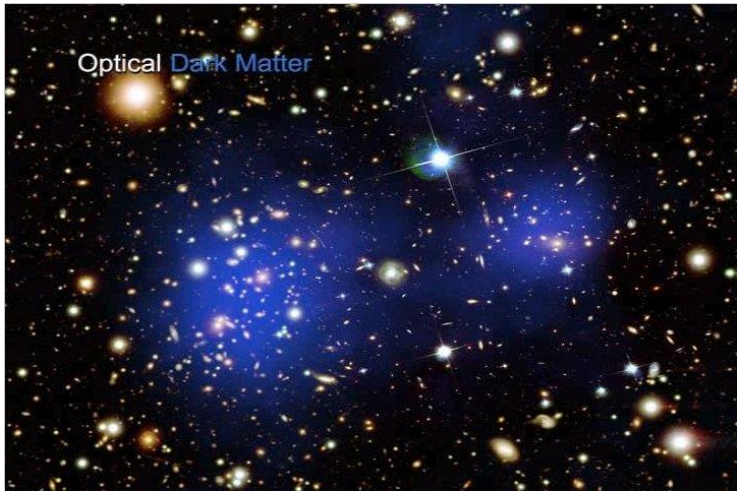




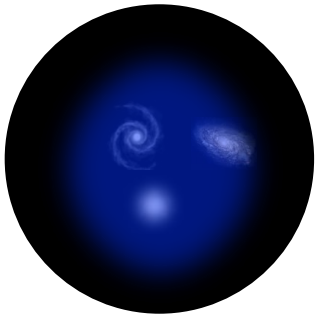


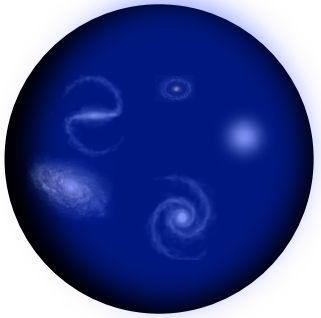


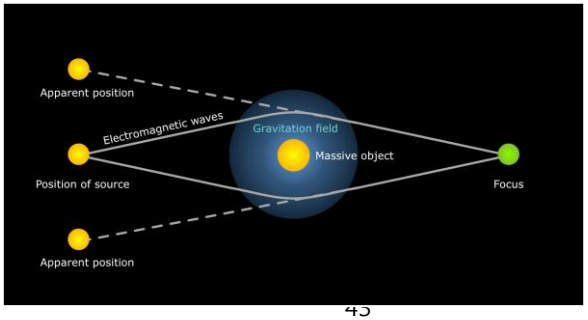
중력렌즈: 가장 많은 질량이 모여있는 영역

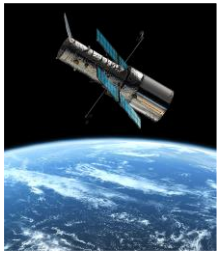


거의 그냥 통과



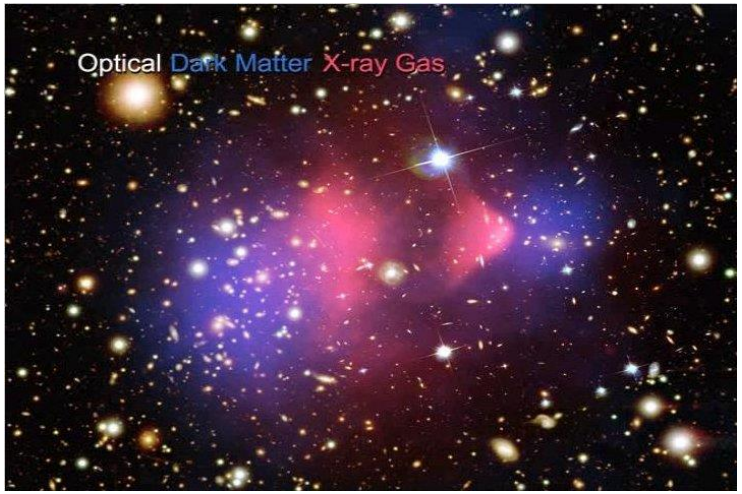






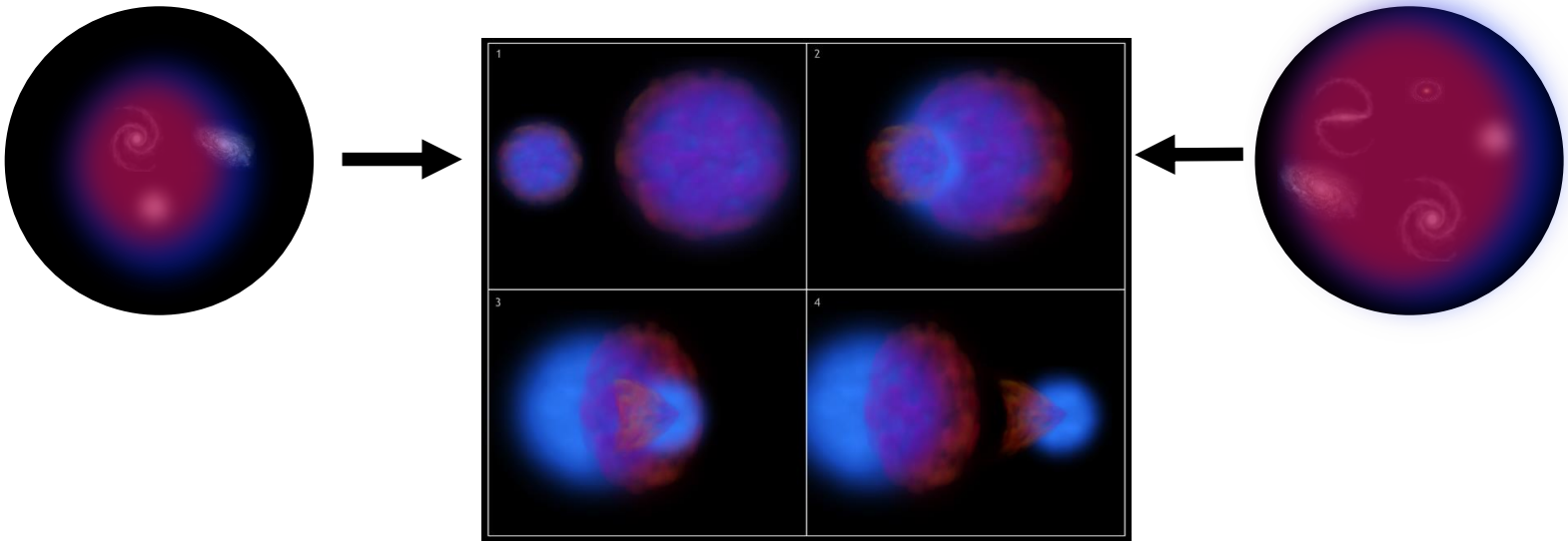
총알 은하단 1E 0657-558 : 별+가스+암흑물질

(가장 질량이 많이 모여 있는 영역과 우리가 아는 물질 위치 사이의 차이 발생)



$$\frac{\sigma_{\mathrm{DM}}}{m_{\mathrm{DM}}} \leq 1\mathrm{cm}^2/\mathrm{g}$$

$$(v_{\mathrm{DM}} \sim 10^3\mathrm{km/sec})$$

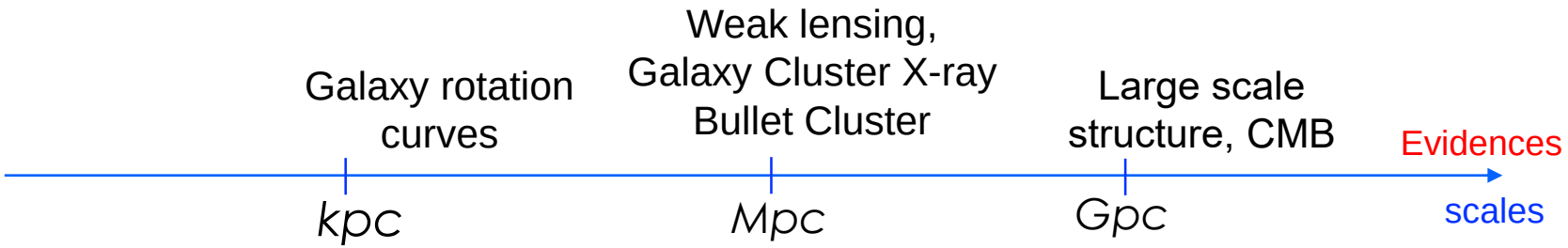


암흑물질의 거시적인 특성

1. 중력으로 상호작용하고 쉽게 중력으로 뭉쳐서 구조를 만들 수 있다. (질량이 있고 차갑다)
2. 우주의 나이(13.7Gy)만큼이나 오래 존재한다. (매우 안정적이다)
3. 빛을 (거의) 방출하지 않고 반사하지도 않는다. (전자기 및 강한 상호작용을 (거의) 하지 않는다)
4. 은하의 암흑 헤일로는 구형이 가깝고 디스크 형태가 아니다. (에너지 손실이 적다)
5. 평균적으로 우주 에너지의 25-27% 를 차지한다. (보이는 물질의 4~5배)
6. 태양계 주변에서의 암흑물질의 밀도는 $\rho_{\mathrm{DM}} = (0.3 - 0.4)\mathrm{GeV/cm^3}$ 이다.
7. 암흑물질과 보이는 물질, 혹은 암흑물질과 암흑물질 사이의 상호작용은 꽤 제약되어 있다.

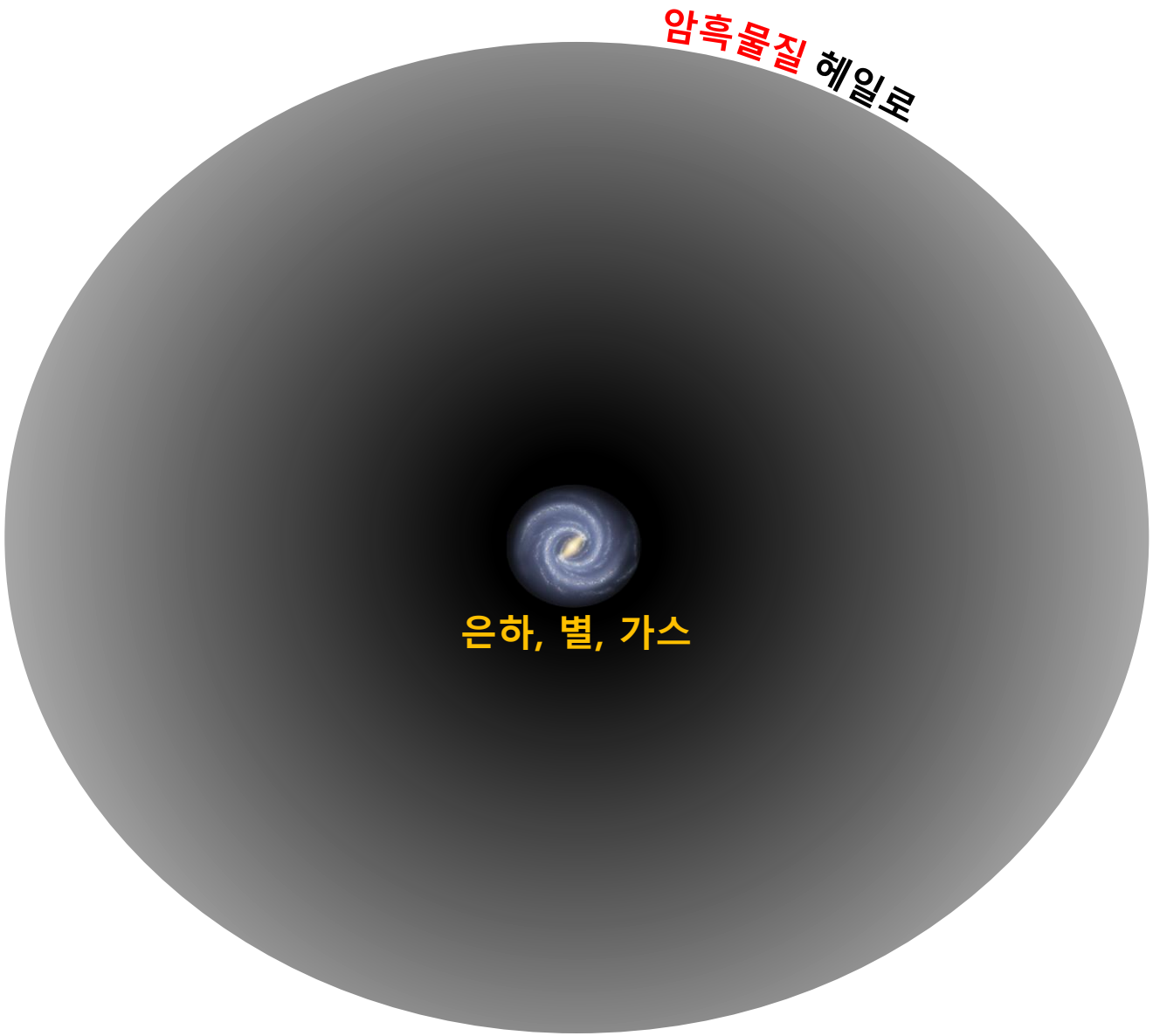


암흑물질의 실루엣



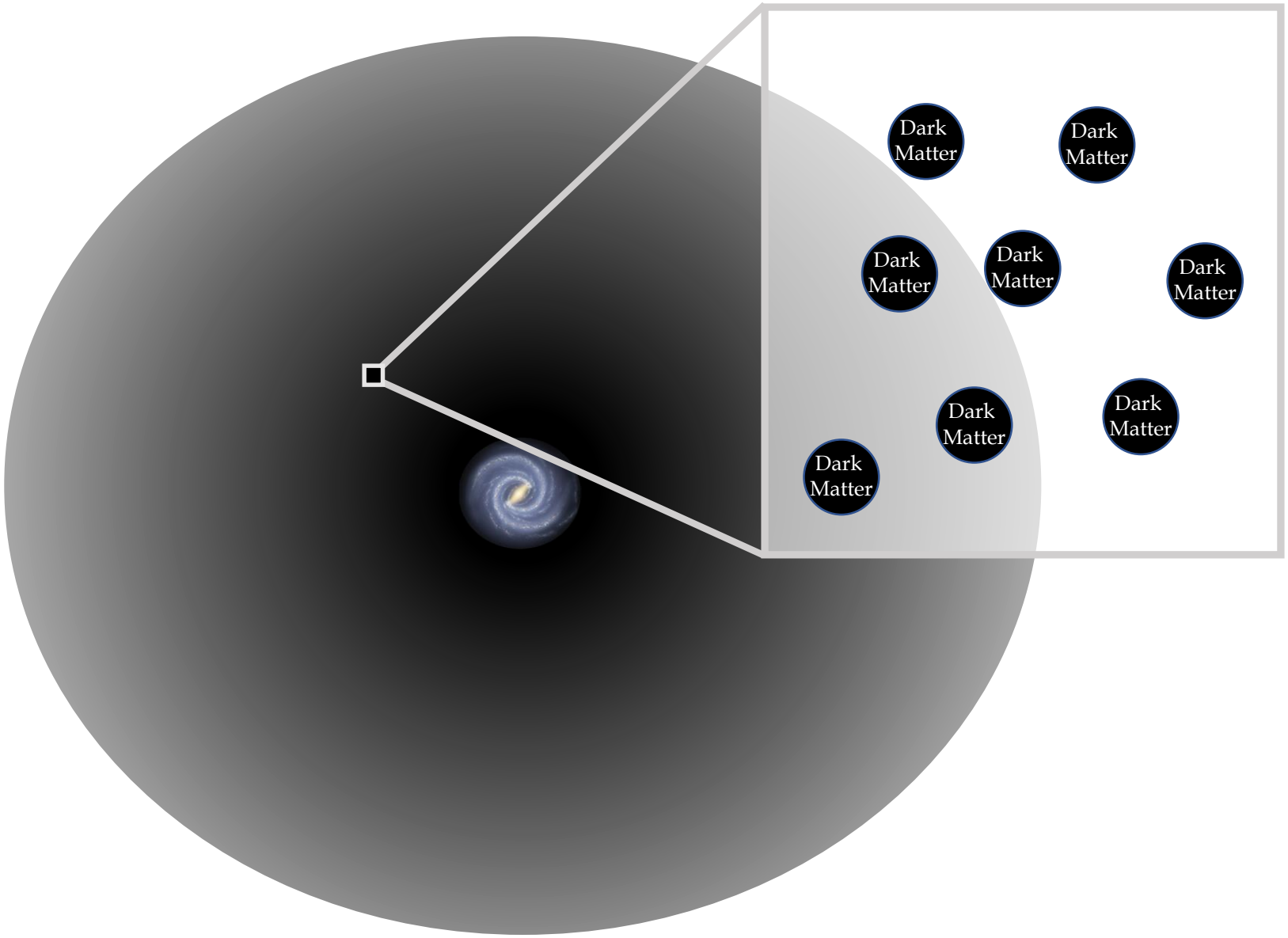
암흑물질 탐구

“암흑물질의 본성”이란?



암흑물질을 이루는 가장 작은 구성 단위의 성질

암흑물질의 기본 단위



암흑물질의 기본 단위의 성질에 대한 질문들



파동에 가까운지



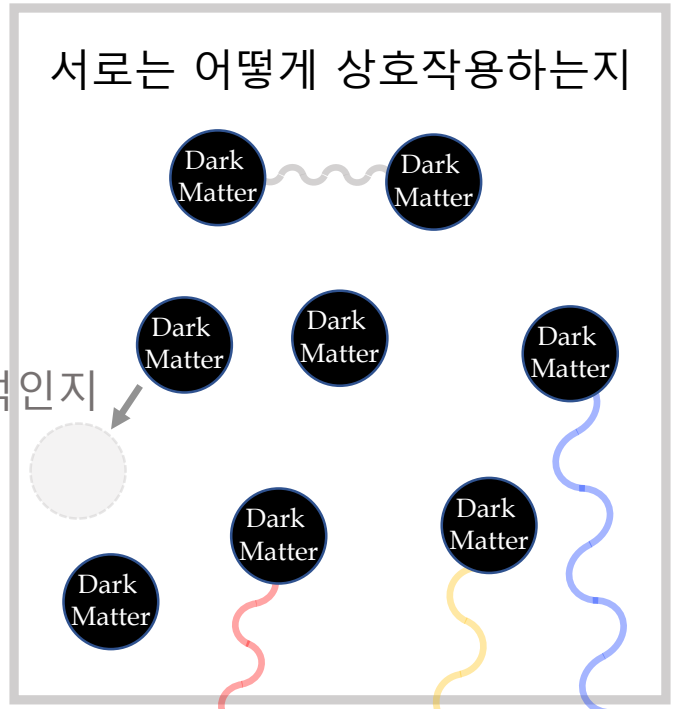
기본입자에 가까운지





달, 지구, 태양 정도로 무겁고 밀도가 높은 천체에 가까운지

서로는 어떻게 상호작용하는지



얼마나 안정적인지

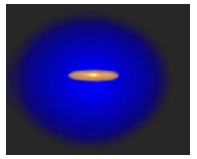


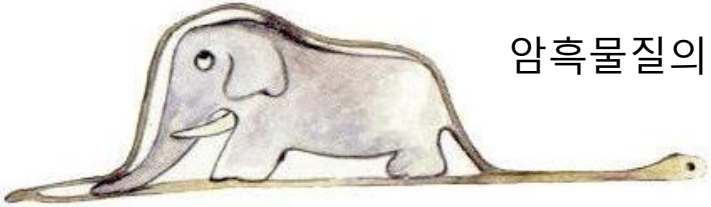
중력 이외의 다른 상호작용은 없는지

어떻게 생성되는지

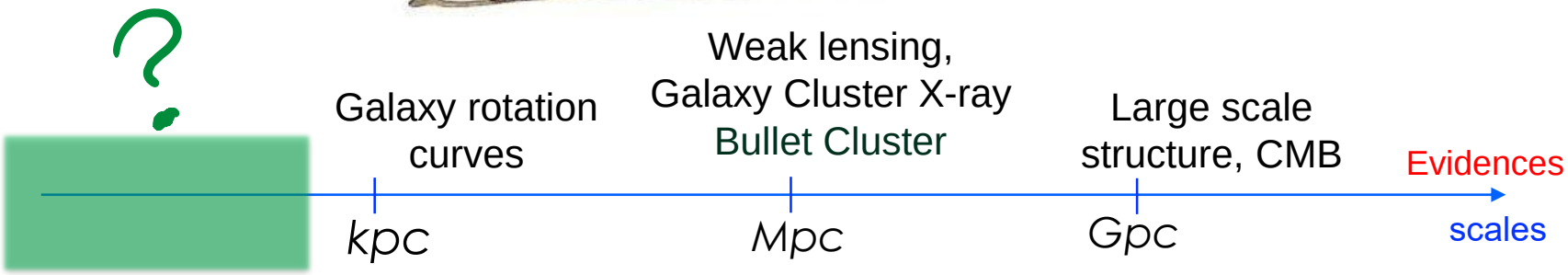
암흑물질의 미시적인 특성

1. 암흑물질의 기본단위는 기본입자인가, 복합입자인가, 천체인가? 보존인가? 페르미온인가?
2. 암흑물질은 왜 안정적인가?
3. 암흑물질은 중력 외에 표준모형 입자와 어떠한 상호작용을 하는가?
4. 암흑물질이 포함된 암흑세계의 구성성분과 자체 상호작용은 어떻게 되는가?
5. 암흑물질의 초기우주에서의 생성 메커니즘은 무엇인가?
6. Sub-kpc 스케일에서 어떻게 암흑물질을 검출할 수 있을까?
7. 이 모든 질문에 의한 답은 어떤 **관측 가능한 또다른 예측**을 제공하는가?





암흑물질의 본성에 대한 하나의 추측



암흑물질의 입자물리학적 접근

이러한 질문들은 기본입자에 대한 우리의 지식을 확장하거나, 초기우주의 진화에 대한 우리의 이해를 확장해야 할 강력한 필요성을 제공한다.

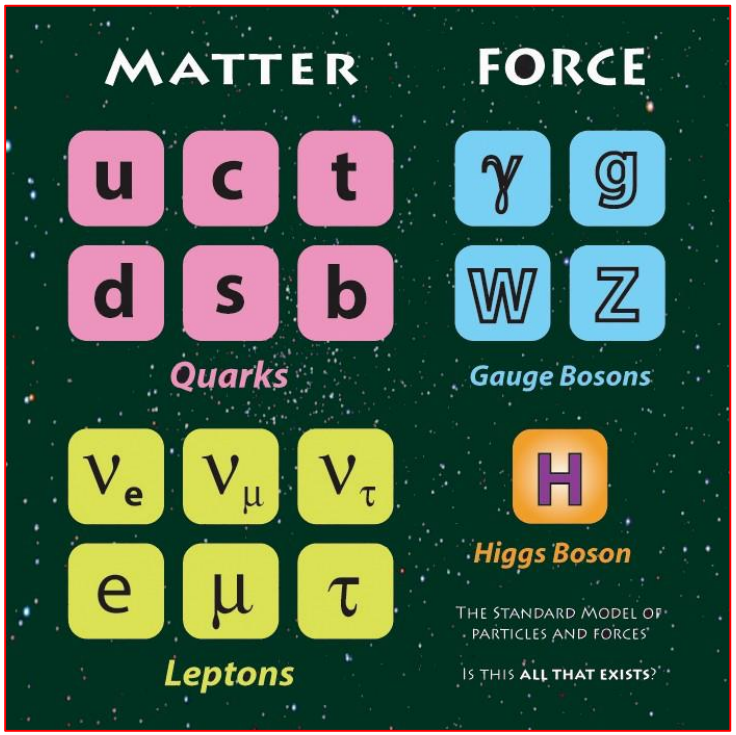
The Standard Model



암흑물질의 입자물리학적 접근

이러한 질문들은 기본입자에 대한 우리의 지식을 확장하거나, 초기우주의 진화에 대한 우리의 이해를 확장해야 할 강력한 필요성을 제공한다.

The Standard Model



(new) interactions

Dark Sector

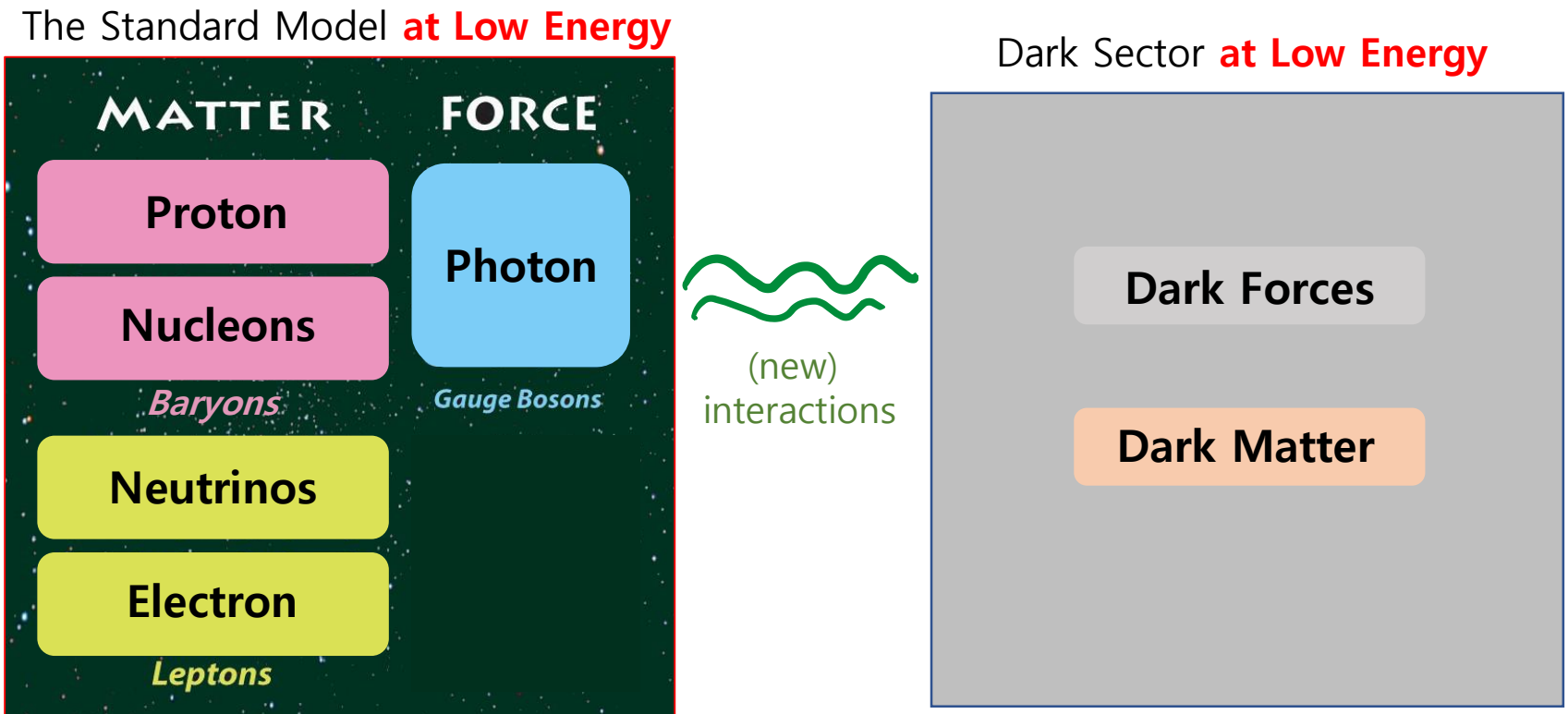
(Dark) Particles

Dark Forces

(Dark) Fields

암흑물질의 입자물리학적 접근

이러한 질문들은 기본입자에 대한 우리의 지식을 확장하거나, 초기우주의 진화에 대한 우리의 이해를 확장해야 할 강력한 필요성을 제공한다.

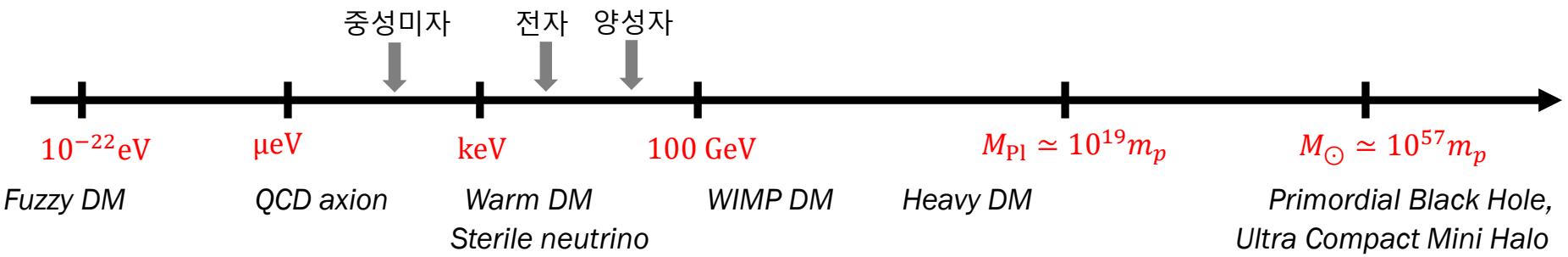


질량에 따른 다양한 암흑물질 후보들

$$\bar{\rho}_{\rm DM} = m_{\rm DM}\,\bar{n}_{\rm DM} = (0.25-0.27)\bar{\rho}_{\rm tot} \simeq 1.2\times 10^{-6}{\rm GeV/cm^3}$$

$$G = \frac{1}{M_{\rm Planck}^2} \qquad \left(M_{\rm Pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 1.22\times 10^{19}{\rm GeV} \right)$$

$$R_{\rm BH} = 2Gm_{\rm DM} \ll \lambda_{\rm Compton} = \frac{1}{m_{\rm DM}} \qquad R_{\rm BH} \gg \lambda_{\rm Compton}$$

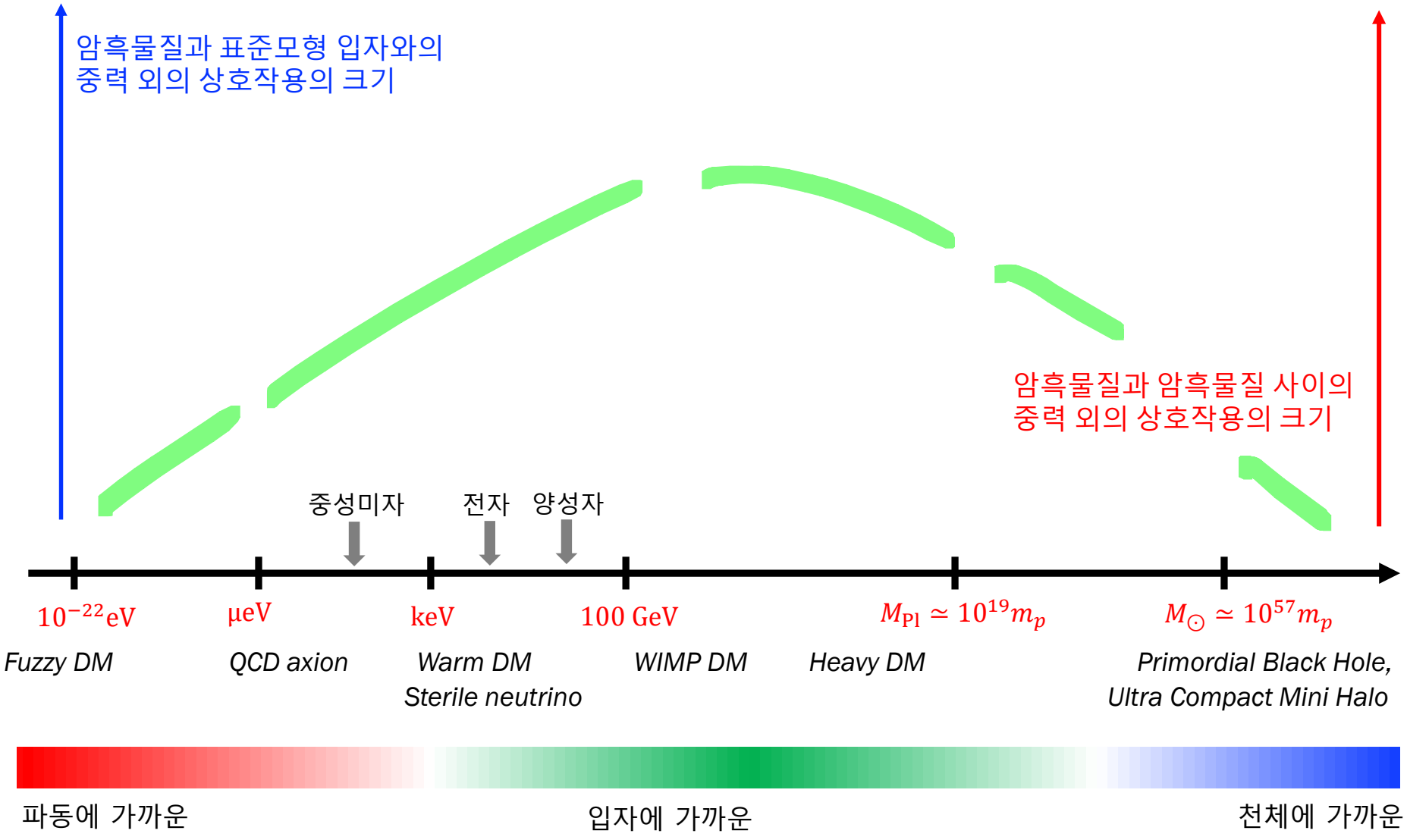




파동에 가까운 입자에 가까운 천체에 가까운

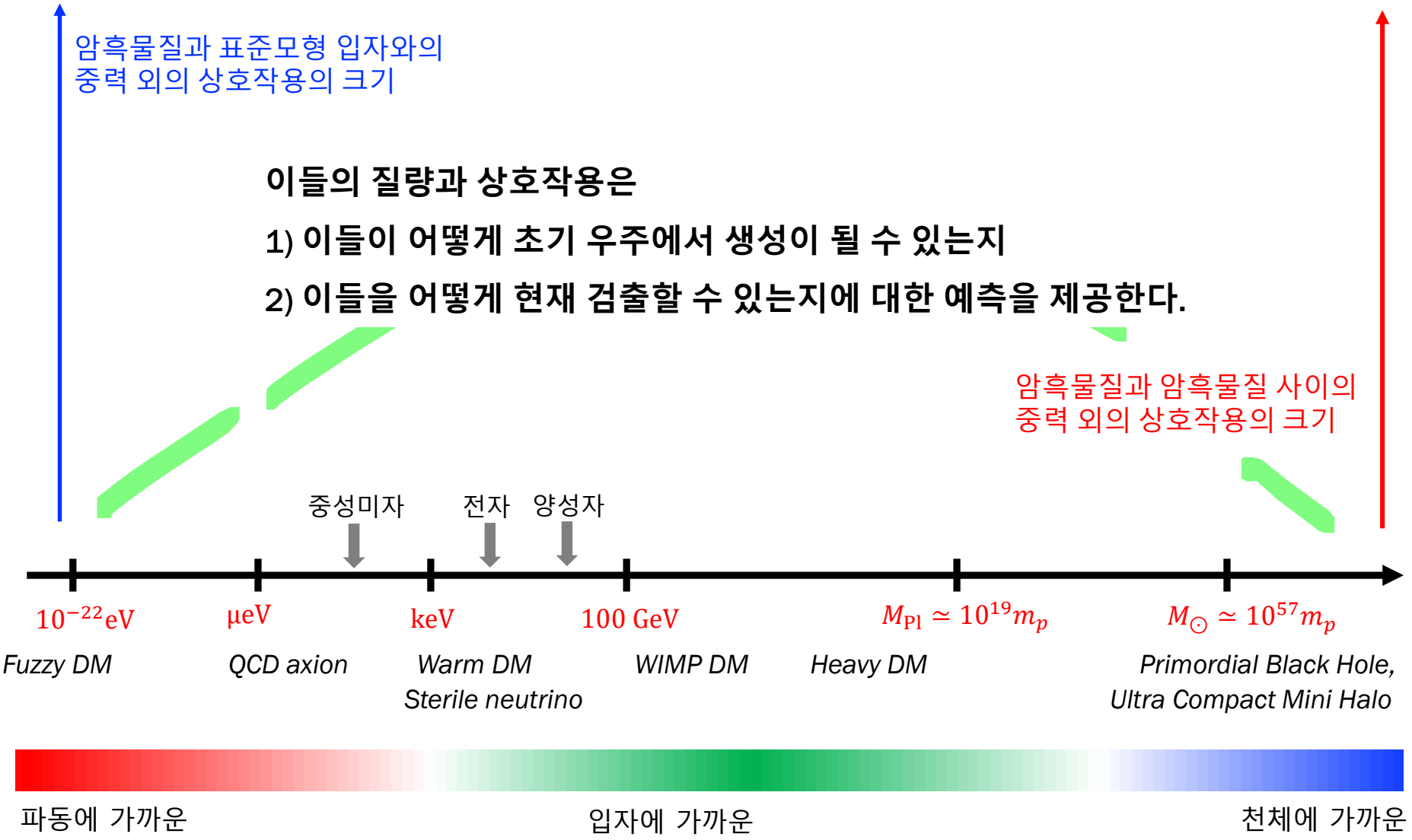
질량과 상호작용에 따른 다양한 암흑물질 후보들

$$\bar{\rho}_{\rm DM} = m_{\rm DM}\,\bar{n}_{\rm DM} = (0.25-0.27)\bar{\rho}_{\rm tot} \simeq 1.2\times10^{-6}{\rm GeV/cm^3}$$



질량과 상호작용에 따른 다양한 암흑물질 후보들

$$\bar{\rho}_{\rm DM} = m_{\rm DM}\,\bar{n}_{\rm DM} = (0.25-0.27)\bar{\rho}_{\rm tot} \simeq 1.2\times10^{-6}{\rm GeV/cm^3}$$



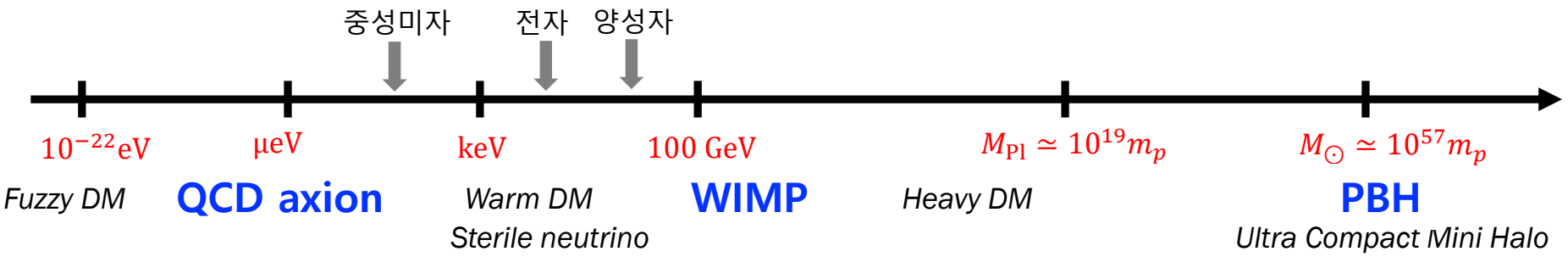
암흑물질의 미시적인 특성

암흑물질 후보에 따라 초기우주에 어떻게 생성이 되고, 어떻게 관측 할 수 있는지에 대해서 대표적으로 많이 연구되고 있는 후보 세 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

QCD Axion (Axion)

Primordial Black Hole (PBH)



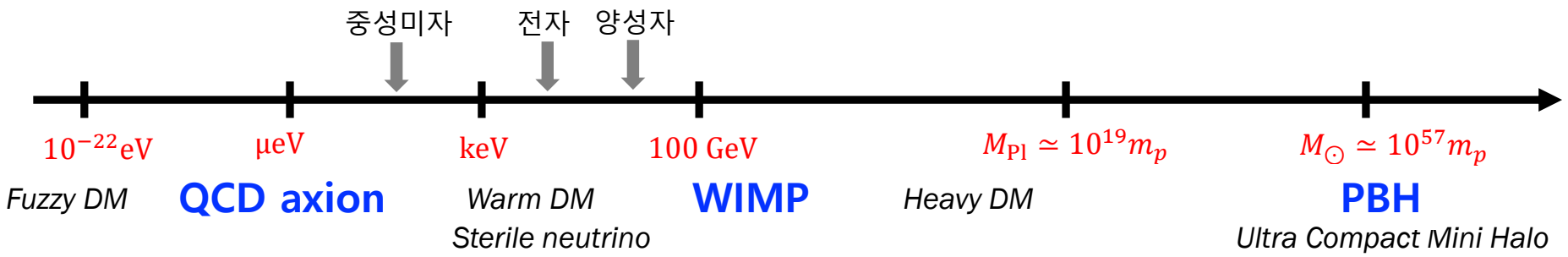
암흑물질의 미시적인 특성

암흑물질 후보에 따라 초기우주에 어떻게 생성이 되고, 어떻게 관측 할 수 있는지에 대해서 대표적으로 많이 연구되고 있는 후보 세 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) : $(\mathbf{0.1 \sim 1000})\ \mathrm{GeV}$

QCD Axion (Axion) : $(\mathbf{0.0001 \sim 10})\ \mu\mathrm{eV}$

Primordial Black Hole (PBH) : $\left(\mathbf{10^{-17} \sim 100}\right) M_{\odot} = \left(\mathbf{10^{-40} \sim 10^{59}}\right)\ \mathrm{GeV}$



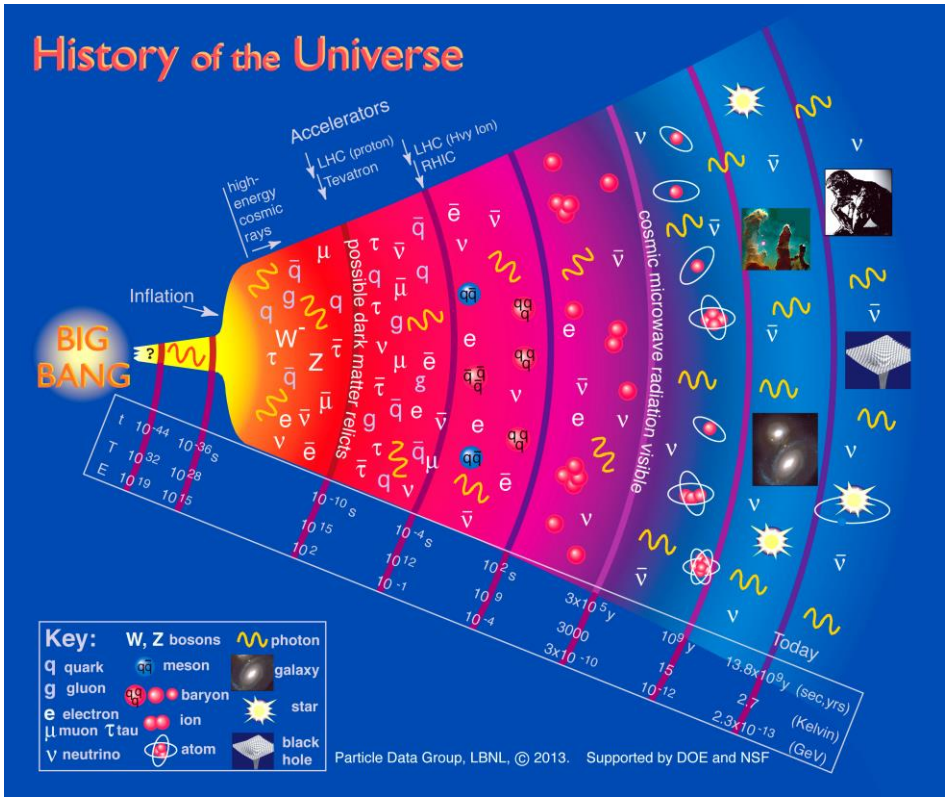
암흑물질의 미시적인 특성

암흑물질 후보에 따라 초기우주에 어떻게 생성이 되고, 어떻게 관측 할 수 있는지에 대해서 대표적으로 많이 연구되고 있는 후보 세 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) : $(\mathbf{0.1 \sim 1000})\ \mathrm{GeV}$

QCD Axion (Axion) : $(\mathbf{0.0001 \sim 10})\ \mu\mathrm{eV}$

Primordial Black Hole (PBH) : $\left(\mathbf{10^{-17} \sim 100}\right) M_{\odot} = \left(\mathbf{10^{-40} \sim 10^{59}}\right)\ \mathrm{GeV}$



빅뱅 우주론

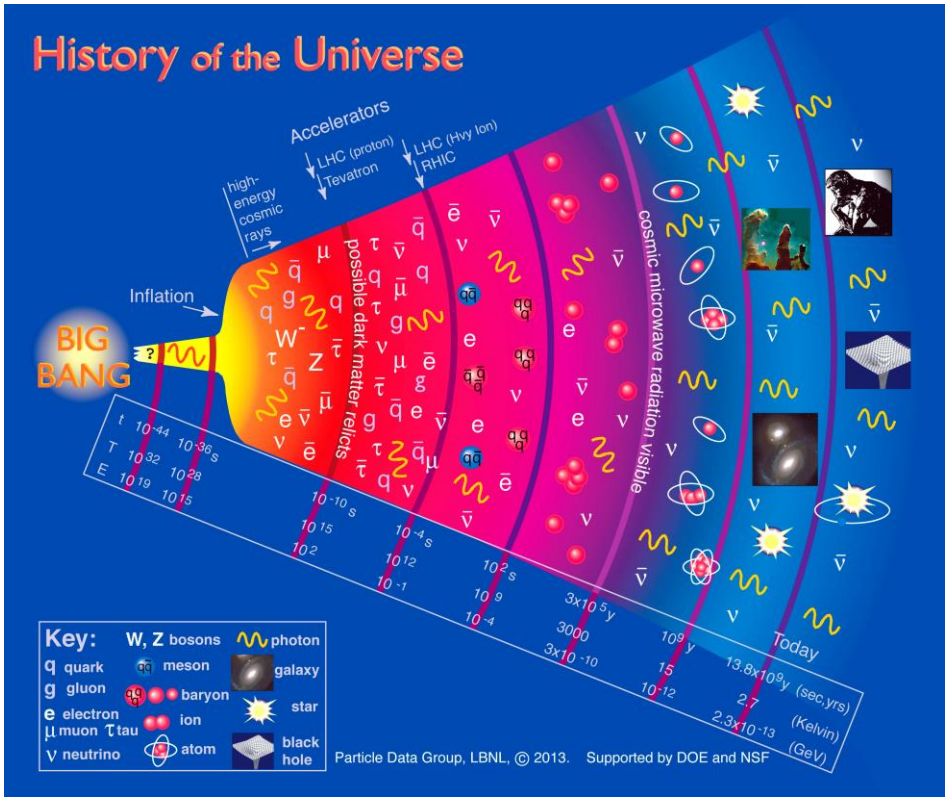
암흑물질의 미시적인 특성

암흑물질 후보에 따라 초기우주에 어떻게 생성이 되고, 어떻게 관측 할 수 있는지에 대해서 대표적으로 많이 연구되고 있는 후보 세 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) : $(\mathbf{0.1 \sim 1000})\ \mathrm{GeV}$

QCD Axion (Axion) : $(\mathbf{0.0001 \sim 10})\ \mu\mathrm{eV}$

Primordial Black Hole (PBH) : $\left(\mathbf{10^{-17} \sim 100}\right) M_{\odot} = \left(\mathbf{10^{-40} \sim 10^{59}}\right)\ \mathrm{GeV}$



빅뱅 우주론

(인플레이션 이후) 우주는 고온 & 고밀도의 거의 균일한 플라즈마 상태에서 출발하여 우주의 팽창과 함께 점점 식어가면서 핵자, 원자가 형성, 그리고 작은 밀도 섭동이 중력에 의해 성장하여 거시적인 물질이 속박되고 분자 형성, 핵융합 등으로 별, 은하, 그리고 은하단으로 진화하여 밤하늘을 다시 밝힌다. (이후 가속팽창을 하고, 오랜 시간이 지나며 별들은 블랙홀로 붕괴하면서 결국 열적 죽음을 맞이한...)

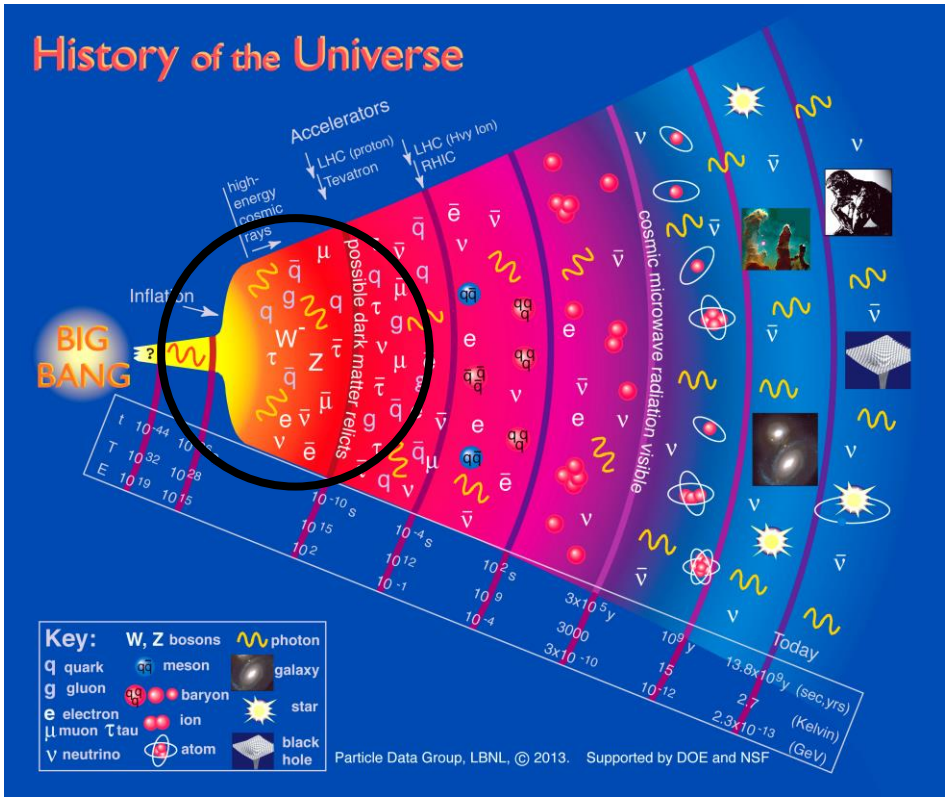
암흑물질의 미시적인 특성

암흑물질 후보에 따라 초기우주에 어떻게 생성이 되고, 어떻게 관측 할 수 있는지에 대해서 대표적으로 많이 연구되고 있는 후보 세 가지를 예를 들어 설명하고자 한다.

Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) : $(\mathbf{0.1 \sim 1000})\ \mathrm{GeV}$

QCD Axion (Axion) : $(\mathbf{0.0001 \sim 10})\ \mu\mathrm{eV}$

Primordial Black Hole (PBH) : $\left(\mathbf{10^{-17} \sim 100}\right) M_{\odot} = \left(\mathbf{10^{-40} \sim 10^{59}}\right)\ \mathrm{GeV}$



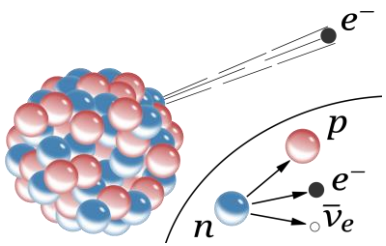
빅뱅 우주론

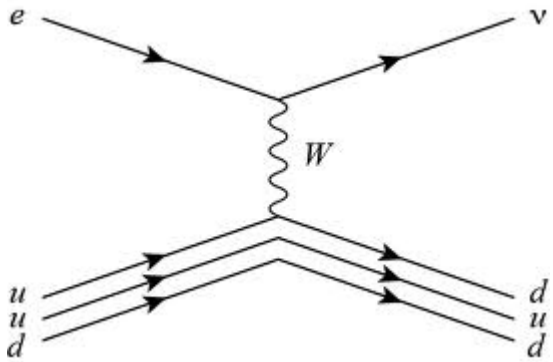
(인플레이션 이후) 우주는 고온 & 고밀도의 거의 균일한 플라즈마 상태에서 출발하여 우주의 팽창과 함께 점점 식어가면서 핵자, 원자가 형성, 그리고 작은 밀도 섭동이 중력에 의해 성장하여 거시적인 물질이 속박되고 분자 형성, 핵융합 등으로 별, 은하, 그리고 은하단으로 진화하여 밤하늘을 다시 밝힌다. (이후 가속팽창을 하고, 오랜 시간이 지나며 별들은 블랙홀로 붕괴하면서 결국 열적 죽음을 맞이한...)

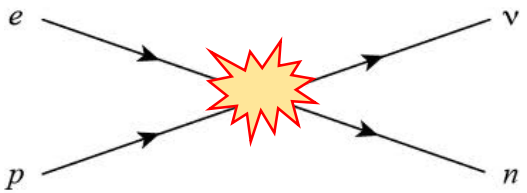
WIMP

윔프는 (대략적으로) 약한 상호작용을 매개하는 게이지보존(W, Z)과 비슷하게 무거우면서, 상호작용의 크기 또한 약작용의 세기와 비슷한 안정적인 입자를 말한다. $m_\chi \sim m_W \sim 100\mathrm{GeV}$

$$e.g.)\ L = i\bar{\chi}\bar{\sigma}^\mu\partial_\mu\chi - \frac{1}{2}m_\chi\chi\chi + \frac{g_\chi^2}{m_\chi^2}\chi\Gamma^a\chi\,\bar{\psi}_{\mathrm{SM}}\Gamma^a\psi_{\mathrm{SM}} \quad (g_\chi \sim 0.1)$$



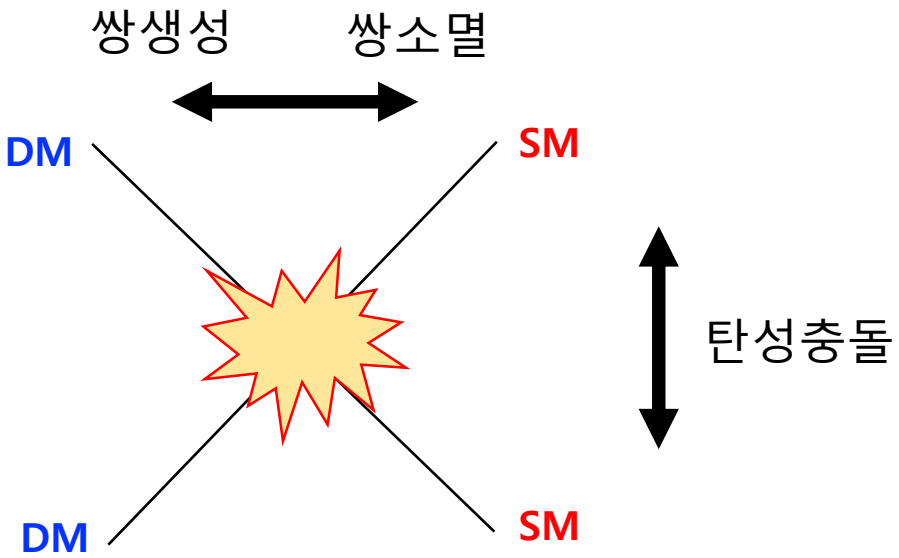




WIMP

윔프는 (대략적으로) 약한 상호작용을 매개하는 게이지보존(W, Z)과 비슷하게 무거우면서, 상호작용의 크기 또한 약작용의 세기와 비슷한 안정적인 입자를 말한다. $m_\chi \sim m_W \sim 100\mathrm{GeV}$

$$e.g.)\ L = i\bar{\chi}\bar{\sigma}^\mu\partial_\mu\chi - \frac{1}{2}m_\chi\chi\chi + \frac{g_\chi^2}{m_\chi^2}\chi\Gamma^a\chi\,\bar{\psi}_{\mathrm{SM}}\Gamma^a\psi_{\mathrm{SM}} \quad (g_\chi \sim 0.1)$$

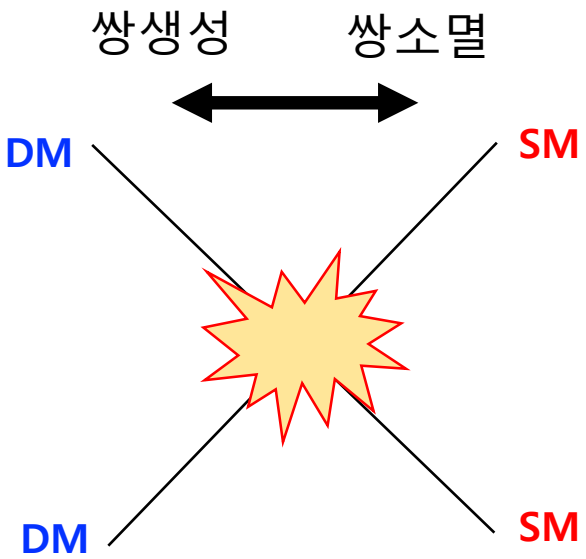


WIMP

윔프는 (대략적으로) 약한 상호작용을 매개하는 게이지보존(W, Z)과 비슷하게 무거우면서, 상호작용의 크기 또한 약작용의 세기와 비슷한 안정적인 입자를 말한다. $m_\chi \sim m_W \sim 100\mathrm{GeV}$

$$e.g.)\ L = i\bar{\chi}\bar{\sigma}^\mu\partial_\mu\chi - \frac{1}{2}m_\chi\chi\chi + \frac{g_\chi^2}{m_\chi^2}\chi\Gamma^a\chi\,\bar{\psi}_{\mathrm{SM}}\Gamma^a\psi_{\mathrm{SM}} \quad (g_\chi \sim 0.1)$$

$$\sigma_{\chi\chi\to\mathrm{SM}}v \sim \frac{g_\chi^4}{8\pi}\frac{1}{m_\chi^2}$$



탄성충돌 $q = \left|\vec{k}_1 - \vec{k}_2\right|$

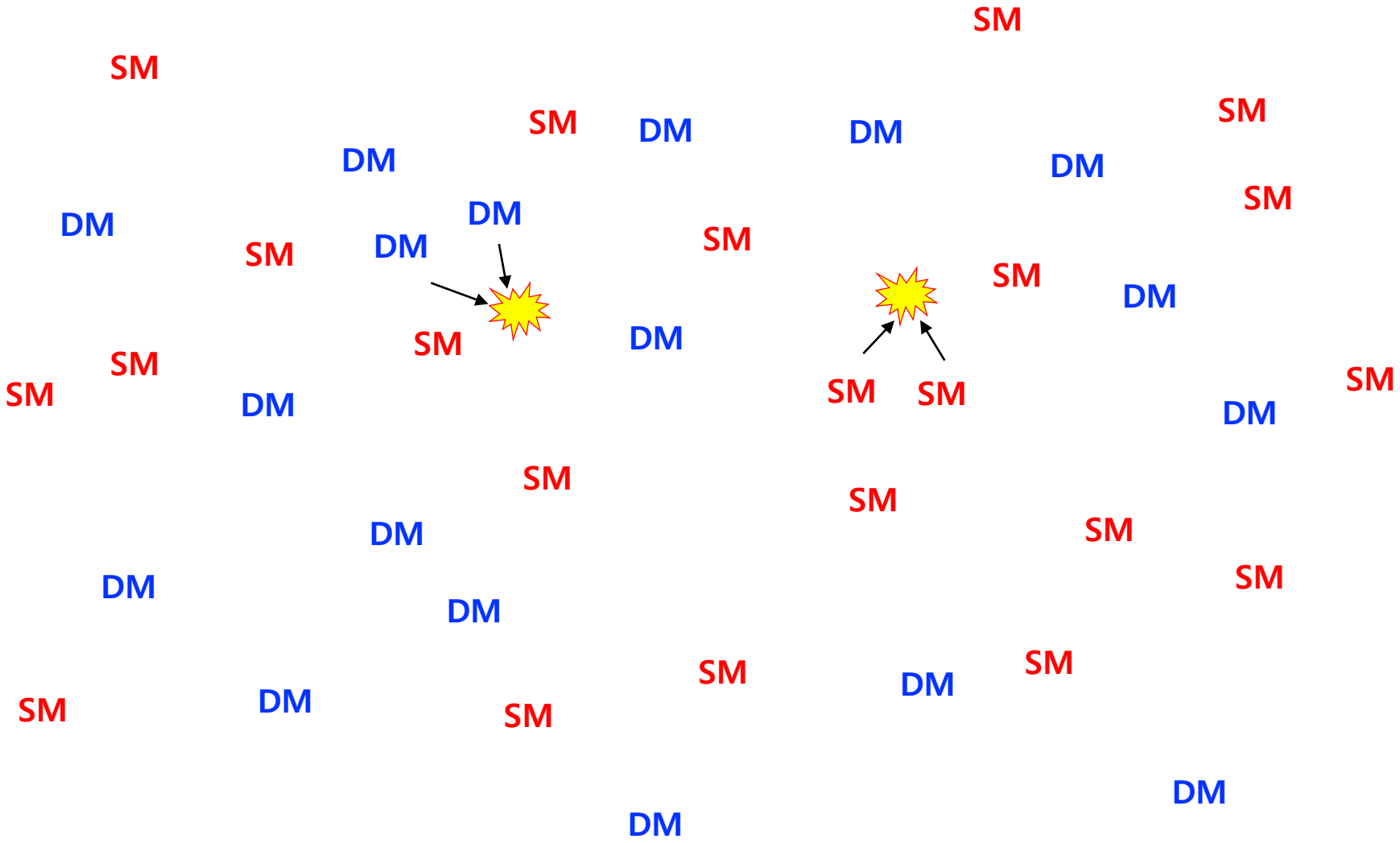
$$\sigma_{\chi\mathrm{SM}\to\chi\mathrm{SM}}v \sim \frac{g_\chi^4}{8\pi}\frac{q^2}{m_\chi^4}$$

Compare $\sigma_{\mathrm{Thomson}} = \frac{8\pi}{3}\frac{\alpha^2}{m_e^2} = \frac{1}{6\pi}\frac{e^2}{m_e^2} \gg \sigma_\chi$

암흑 물질 입자는 Z_2 대칭성($\chi \to -\chi$)에 의해 개별 붕괴를 하지 않고 안정적으로 존재한다.

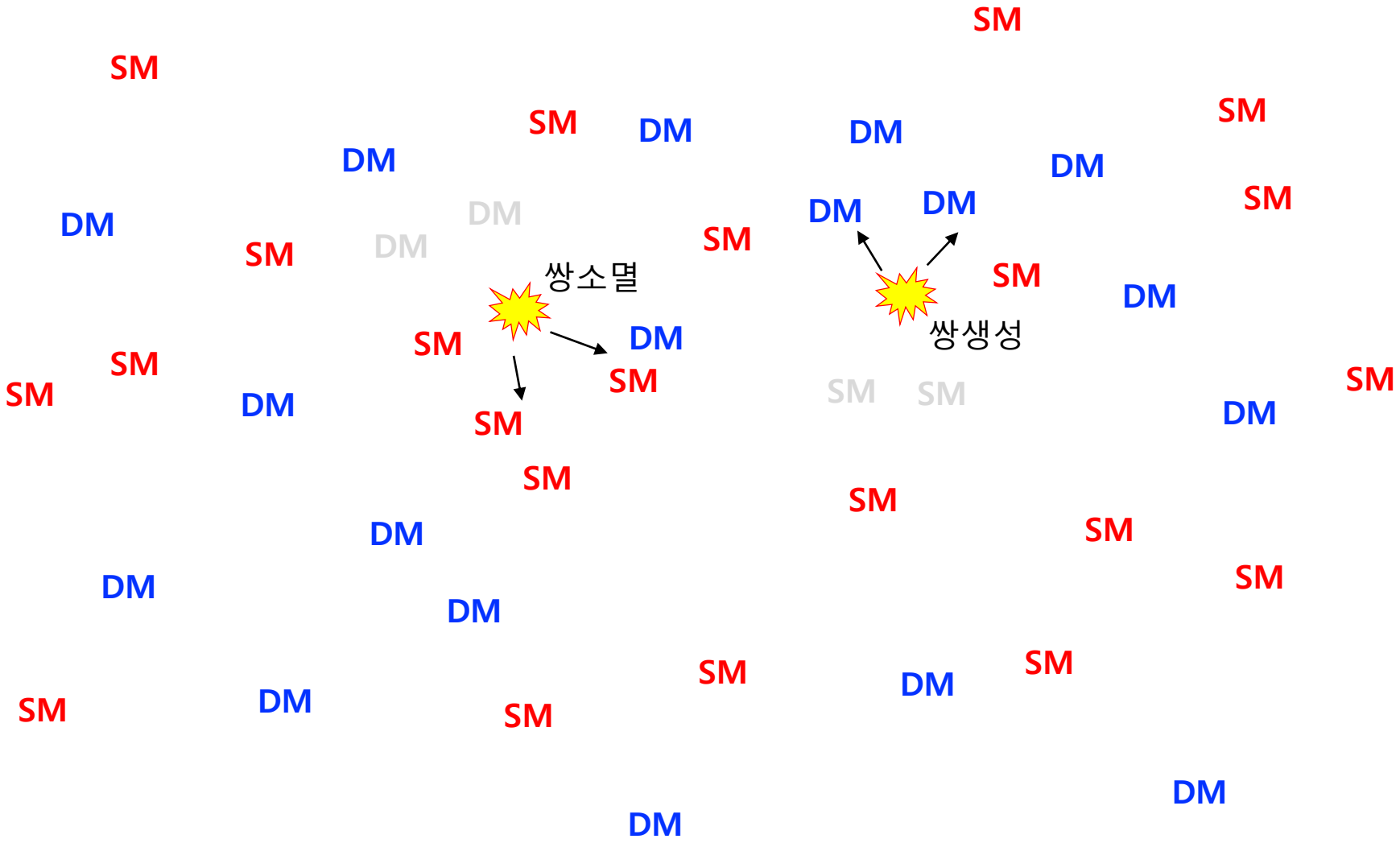
WIMP

$T \geq m_\chi$: χ 는 표준모형 플라즈마와 열평형 상태에 있으면서 쌍생성과 쌍소멸을 반복한다.



WIMP

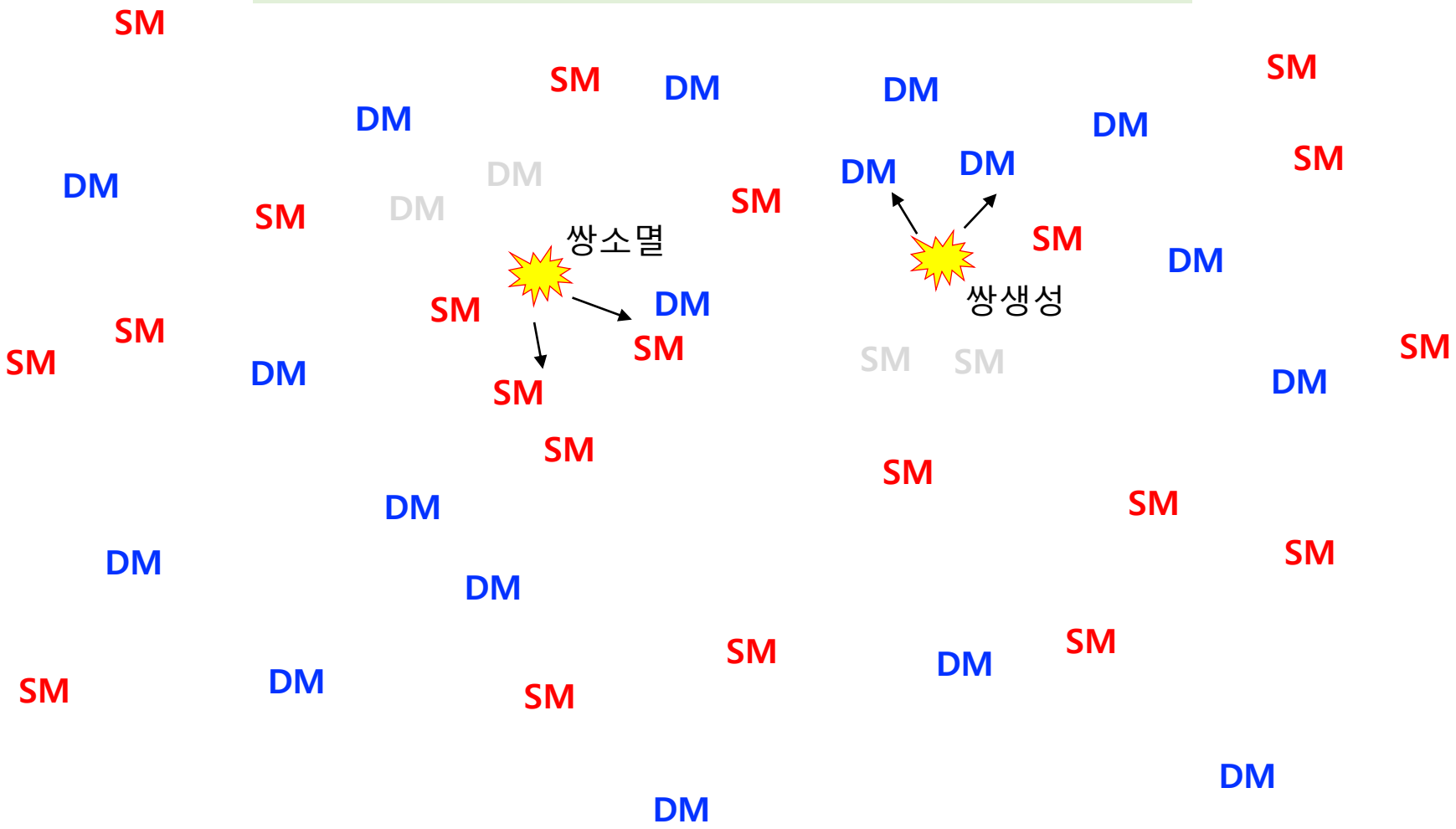
$T \geq m_\chi$: χ 는 표준모형 플라즈마와 열평형 상태에 있으면서 쌍생성과 쌍소멸을 반복한다.



WIMP

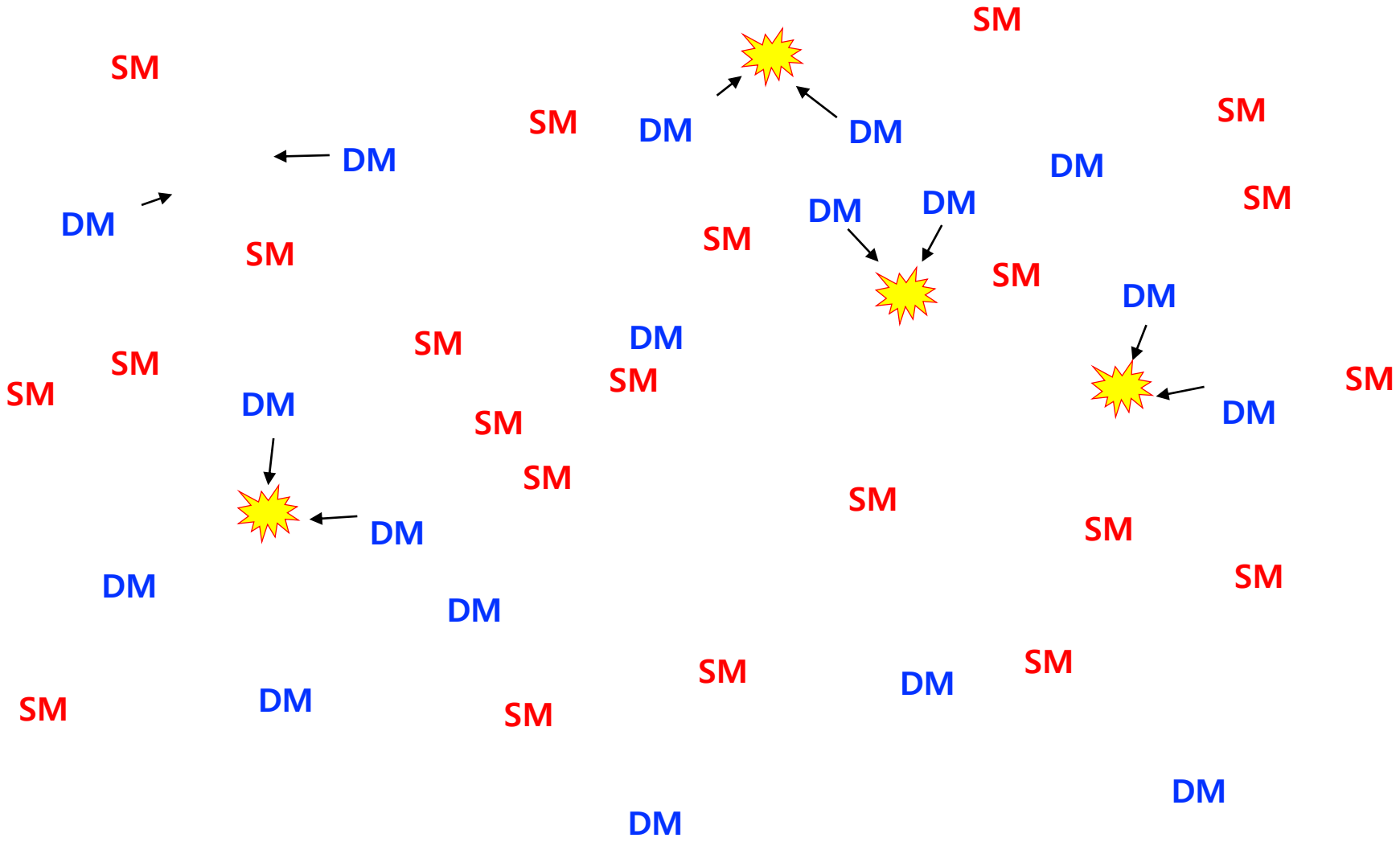
$T \geq m_\chi$: χ 는 표준모형 플라즈마와 열평형 상태에 있으면서 쌍생성과 쌍소멸을 반복한다.

$$f_\chi(p) = \frac{1}{e^{E_\chi/T} \pm 1}, \qquad E_\chi = \sqrt{m_\chi^2 + p^2}, \qquad \mu_\chi = 0$$



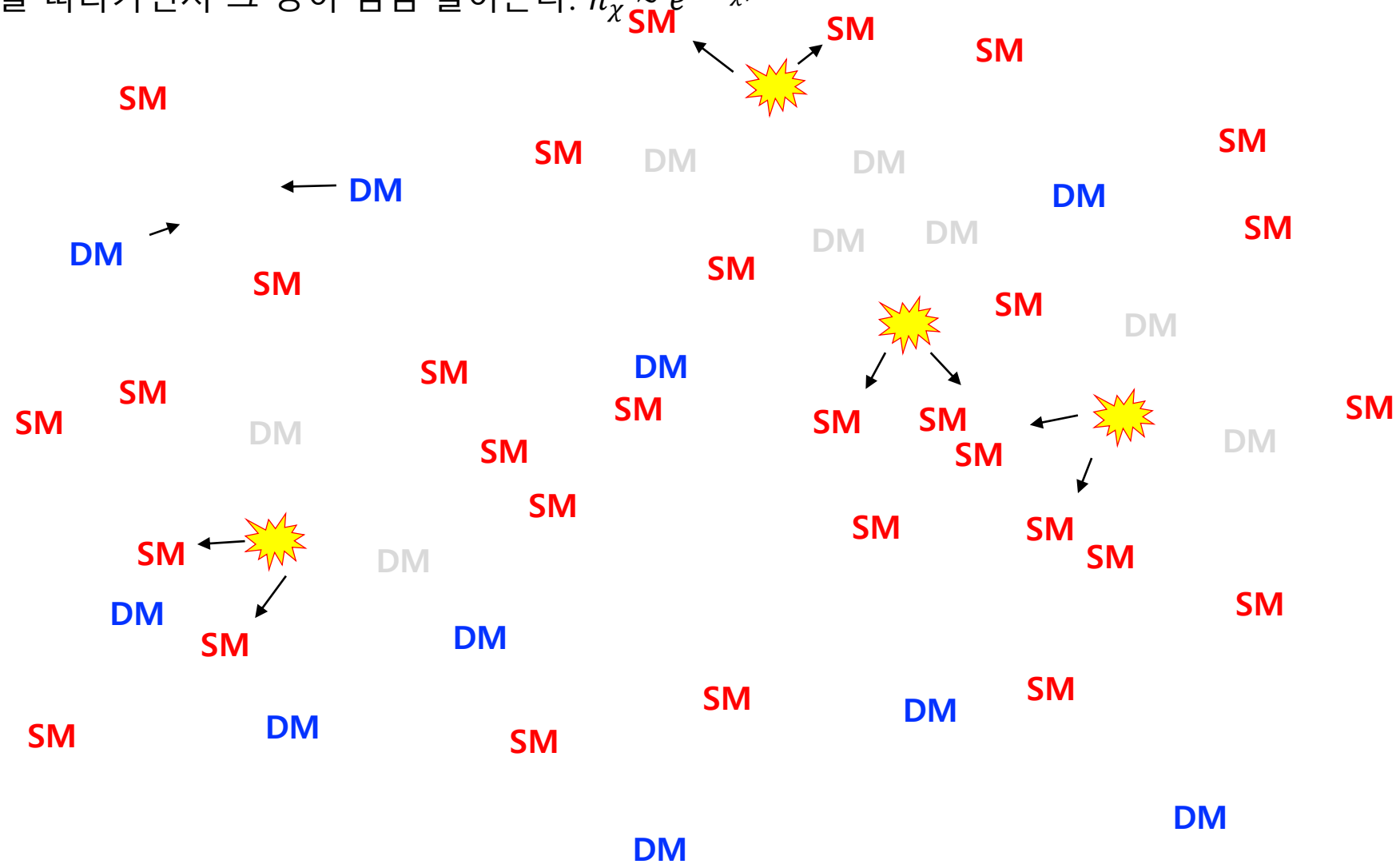
WIMP

$0.05\, m_\chi < T < m_\chi$: 우주의 팽창으로 온도가 점점 떨어지면서 암흑물질의 양은 그 온도에서의 평형값을 따라가면서 그 양이 점점 줄어든다. $n_\chi \sim e^{-m_\chi/T}$



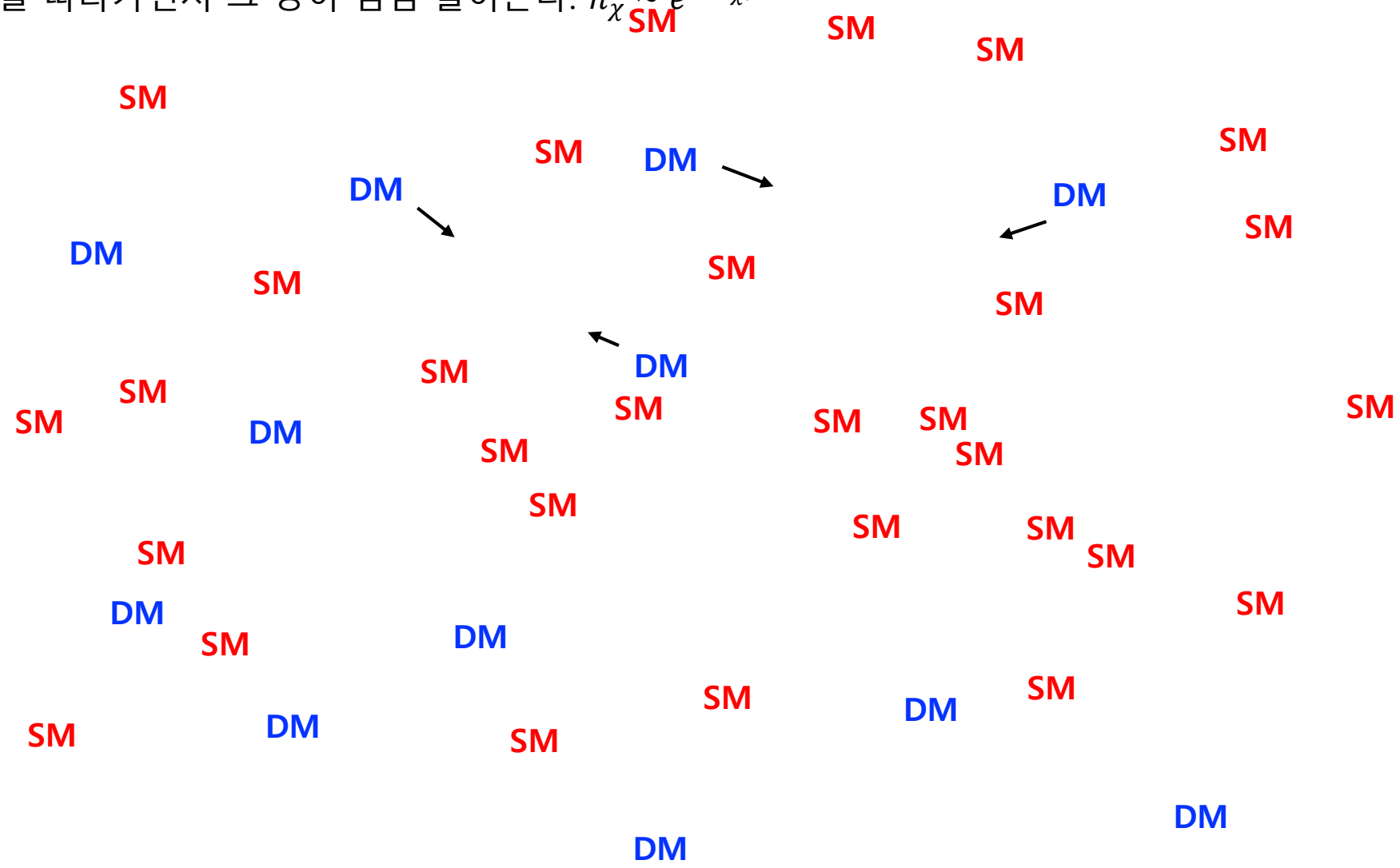
WIMP

$0.05\, m_\chi < T < m_\chi$: 우주의 팽창으로 온도가 점점 떨어지면서 암흑물질의 양은 그 온도에서의 평형값을 따라가면서 그 양이 점점 줄어든다. $n_\chi \sim e^{-m_\chi/T}$


SM
SM
SM
SM
SM
DM
DM
DM
DM
DM
DM
SM
SM
SM
S

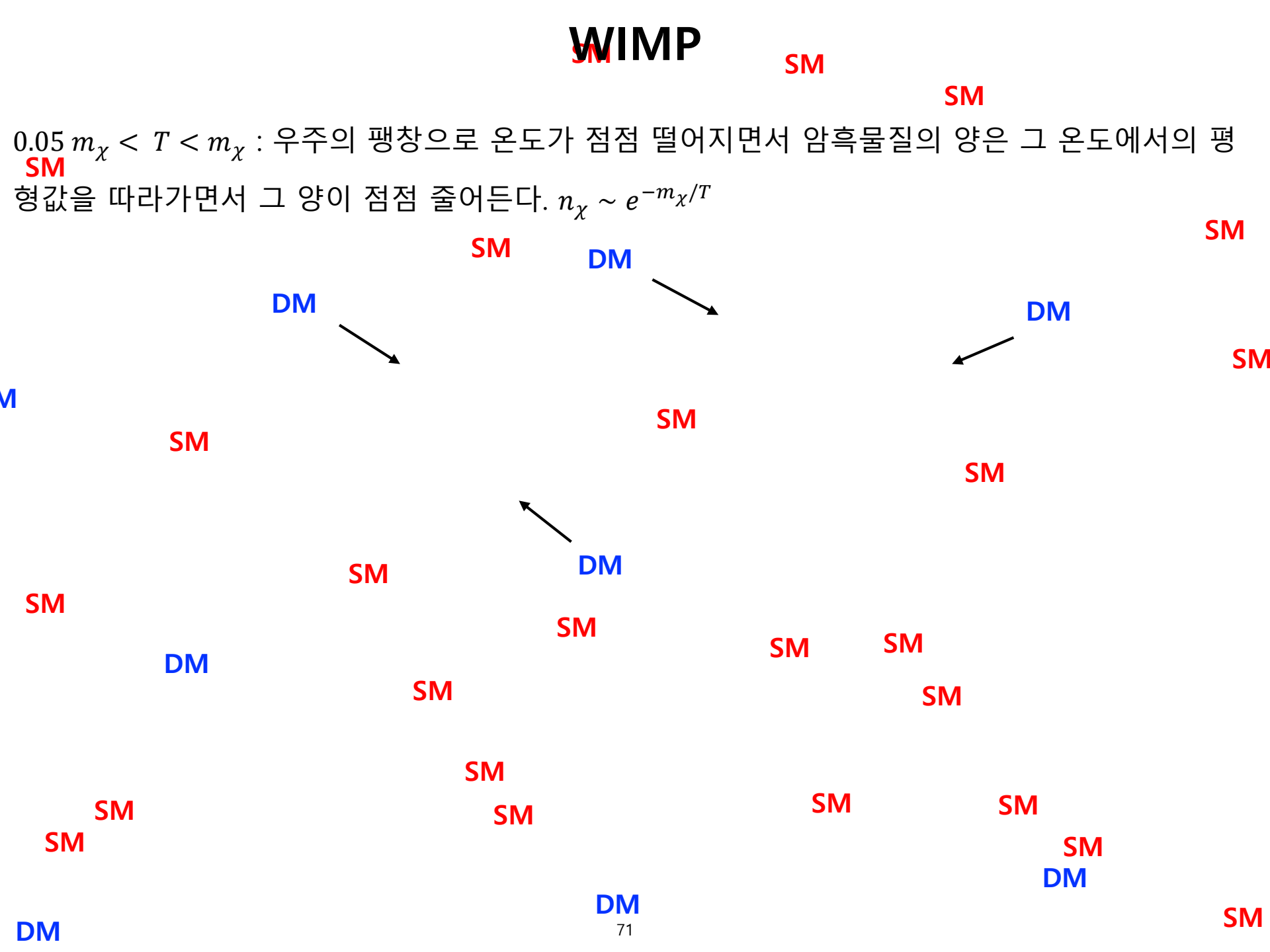
WIMP

$0.05\, m_\chi < T < m_\chi$: 우주의 팽창으로 온도가 점점 떨어지면서 암흑물질의 양은 그 온도에서의 평형값을 따라가면서 그 양이 점점 줄어든다. $n_\chi \sim e^{-m_\chi/T}$



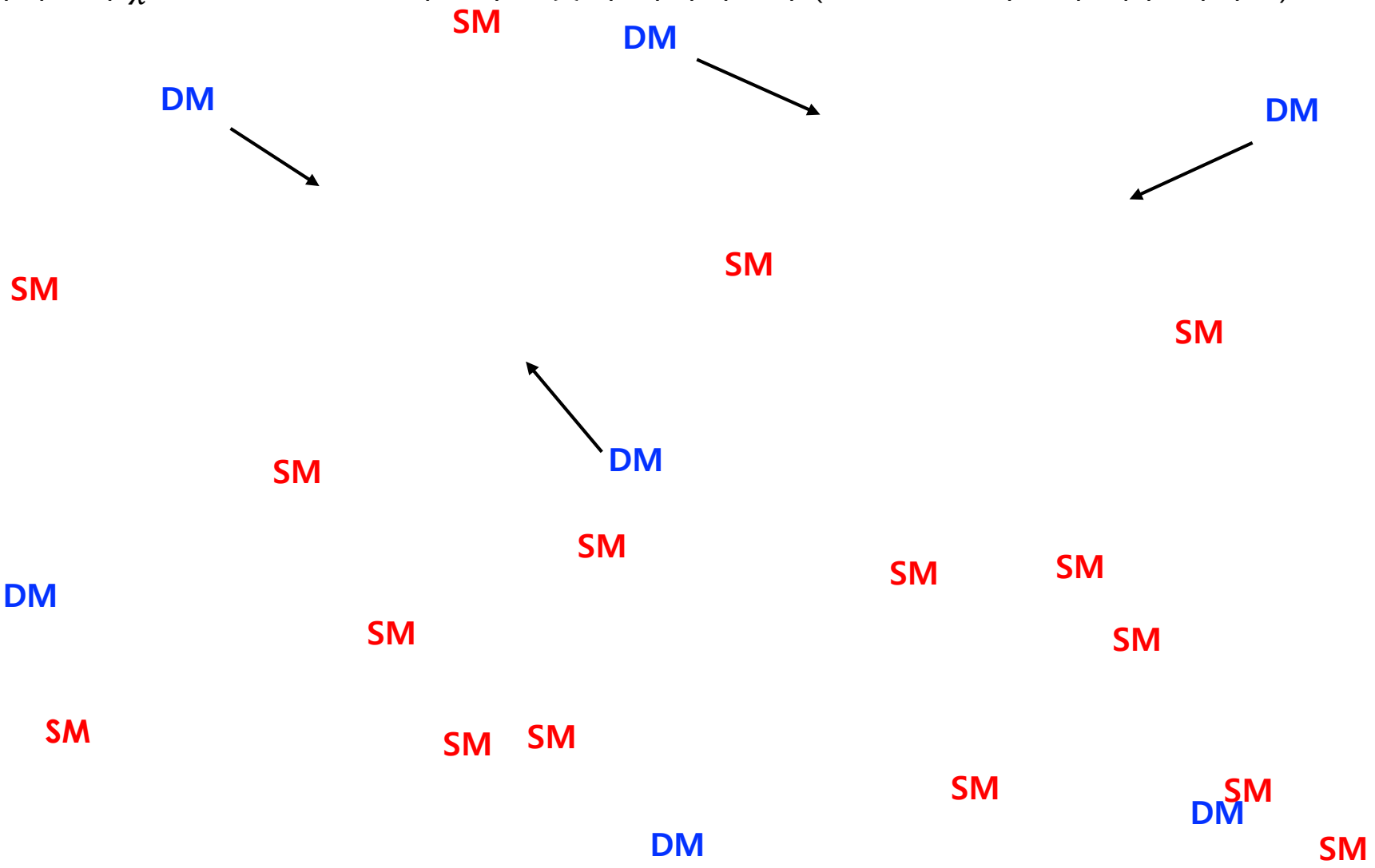
WIMP

$0.05\, m_\chi < T < m_\chi$: 우주의 팽창으로 온도가 점점 떨어지면서 암흑물질의 양은 그 온도에서의 평형값을 따라가면서 그 양이 점점 줄어든다. $n_\chi \sim e^{-m_\chi/T}$



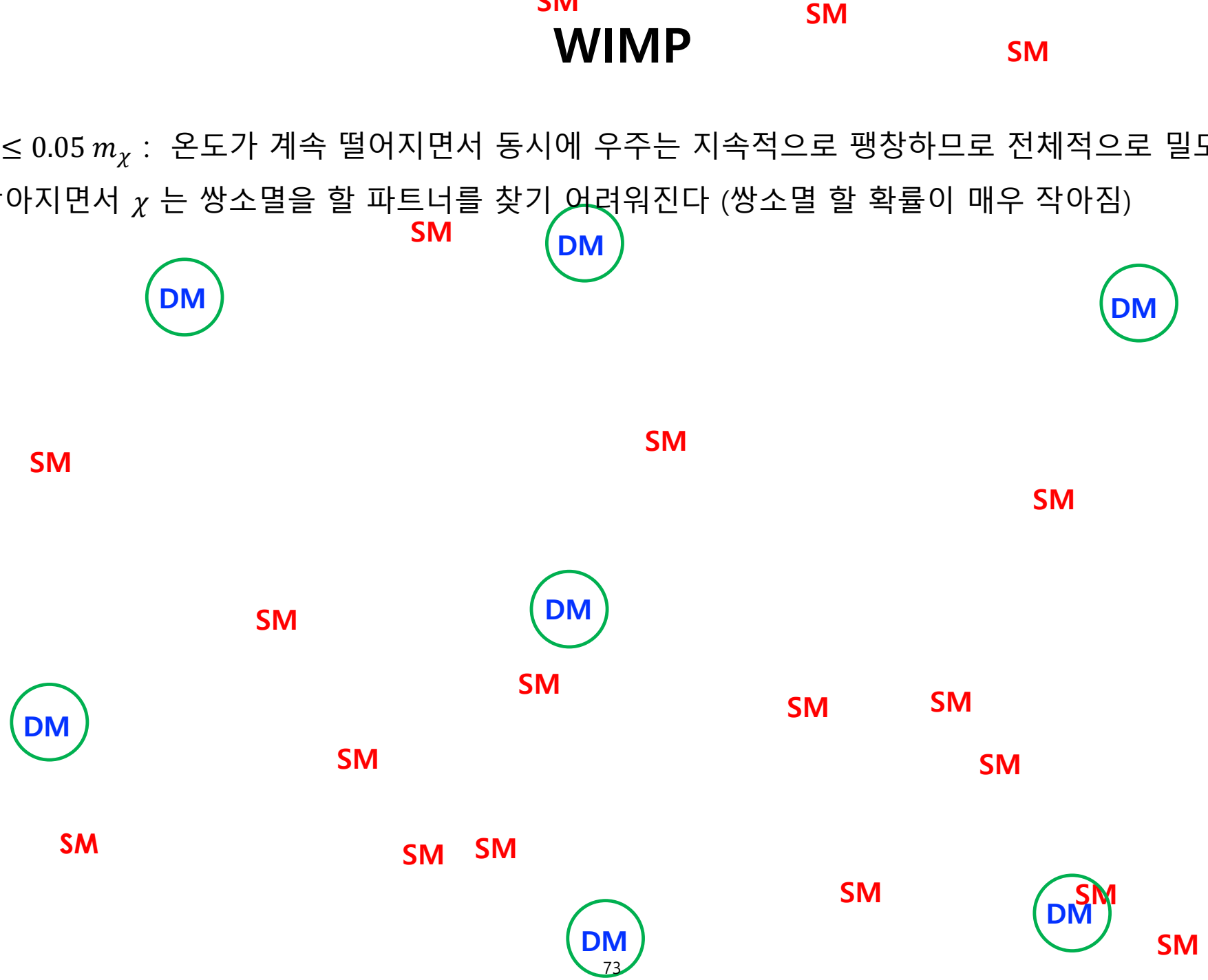
WIMP

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 온도가 계속 떨어지면서 동시에 우주는 지속적으로 팽창하므로 전체적으로 밀도가 작아지면서 χ 는 쌍소멸을 할 파트너를 찾기 어려워진다 (쌍소멸 할 확률이 매우 작아짐)



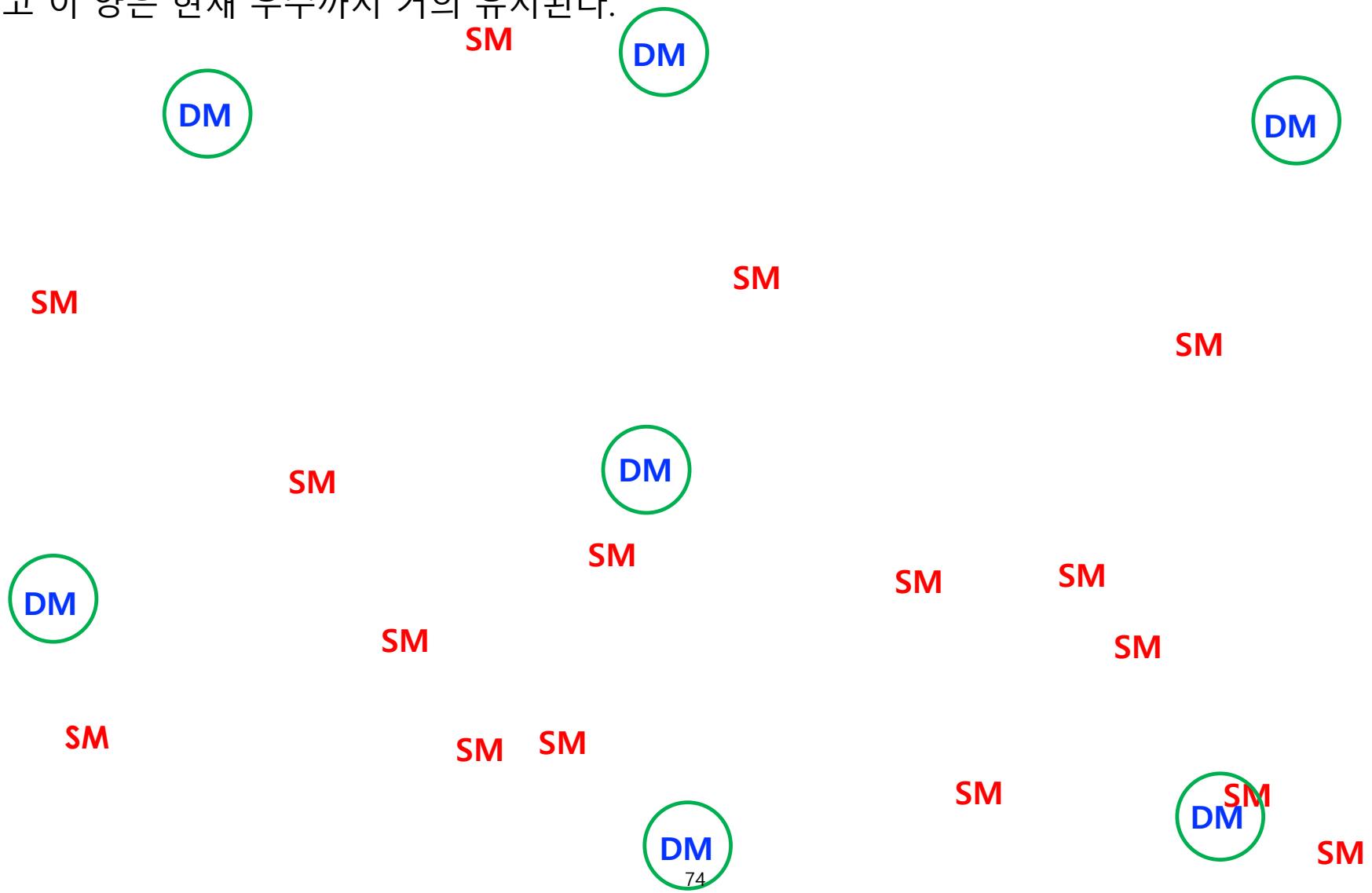
WIMP

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 온도가 계속 떨어지면서 동시에 우주는 지속적으로 팽창하므로 전체적으로 밀도가 작아지면서 χ 는 쌍소멸을 할 파트너를 찾기 어려워진다 (쌍소멸 할 확률이 매우 작아짐)



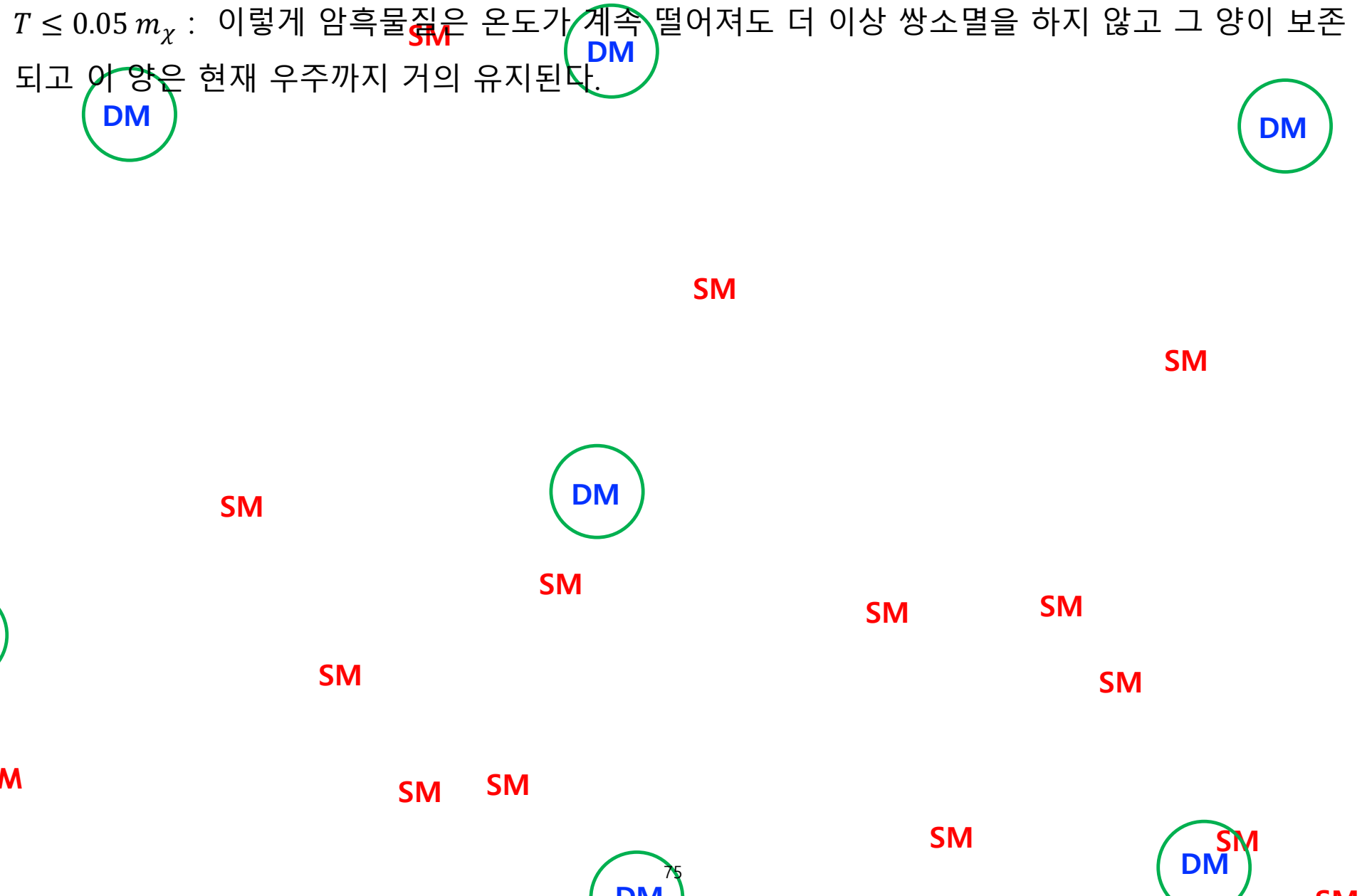
WIMP

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 이렇게 암흑물질은 온도가 계속 떨어져도 더 이상 쌍소멸을 하지 않고 그 양이 보존되고 이 양은 현재 우주까지 거의 유지된다.



WIMP

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 이렇게 암흑물질은 온도가 계속 떨어져도 더 이상 쌍소멸을 하지 않고 그 양이 보존되고 이 양은 현재 우주까지 거의 유지된다.



WIMP

SM

DM

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 이렇게 암흑물질은 온도가 계속 떨어져도 더 이상 쌍소멸을 하지 않고 그 양이 보존

DM

되고 이 양은 현재 우주까지 거의 유지된다.

DM

SM

SM

DM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

WIMP

SM

DM

$T \leq 0.05\, m_\chi$: 이렇게 암흑물질은 온도가 계속 떨어져도 더 이상 쌍소멸을 하지 않고 그 양이 보존

DM

DM

퇴고 이 양은 현재 우주까지 거의 유지된다.

$$\frac{n_{\mathrm{DM}}}{n_\gamma}(\text{today}) = \frac{n_{\mathrm{DM}}}{n_\gamma}(\text{freeze out}) \Rightarrow \left(\frac{\rho_{\mathrm{DM}}}{\rho_{tot}}\right) \simeq 0.25 \left(\frac{3\times 10^{-26}\mathrm{cm}^3/\mathrm{sec}}{\langle \sigma_{\chi\chi\to \mathrm{SM}} v\rangle_{freeze}}\right)$$

SM

SM

SM

DM

SM

SM

SM

SM

SM

SM

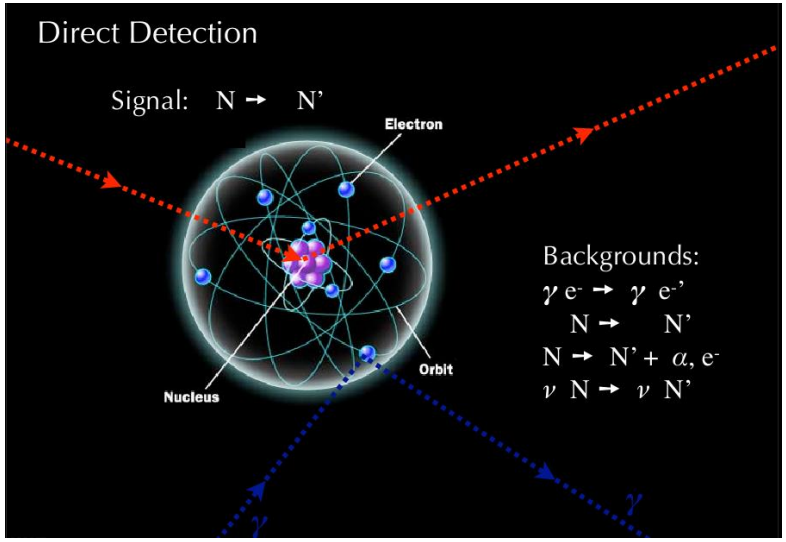
SM

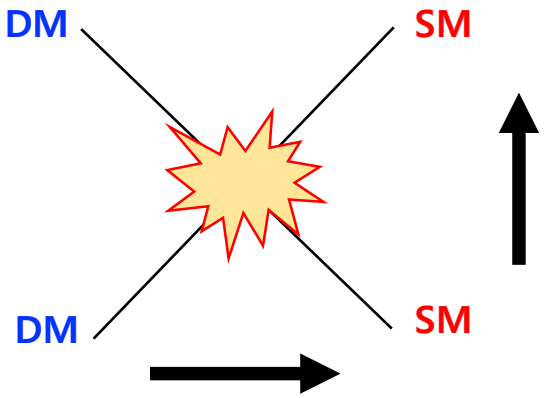
SM

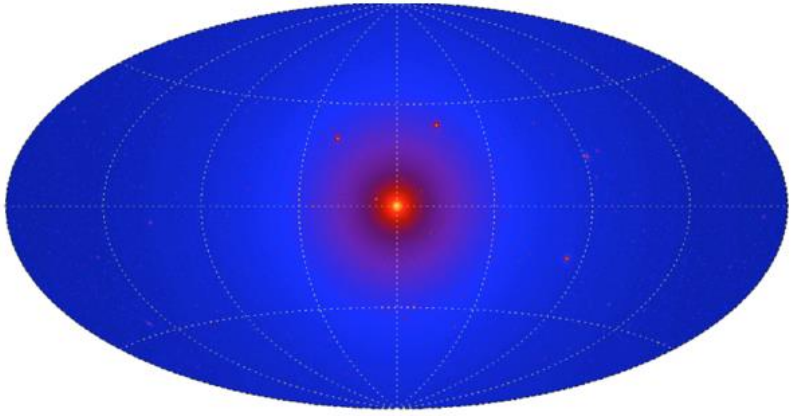
SM

WIMP

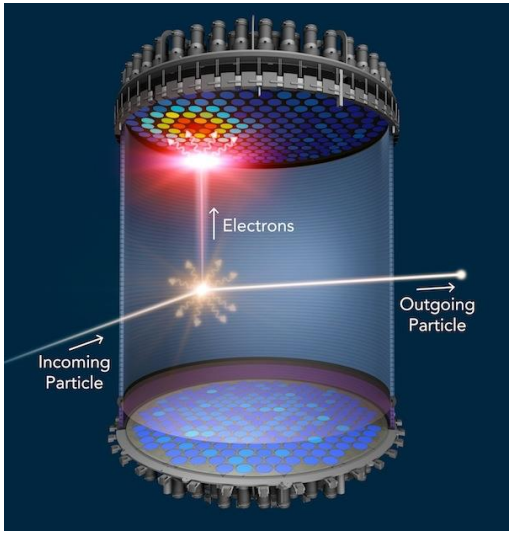
현재 우주에서 비록 중력적인 상호작용에 영향을 미칠 정도는 아니지만 필연적으로 밀도가 높은 은하 중심에서 여전히 쌍소멸을 할 수 있고, 지구 주변에 돌아다니는 암흑물질은 핵자, 전자와 (비) 탄성 충돌을 하게 된다.





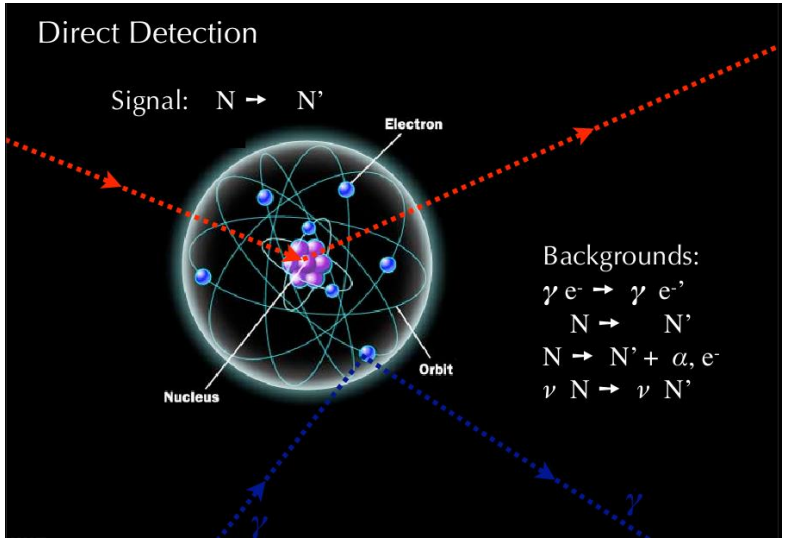


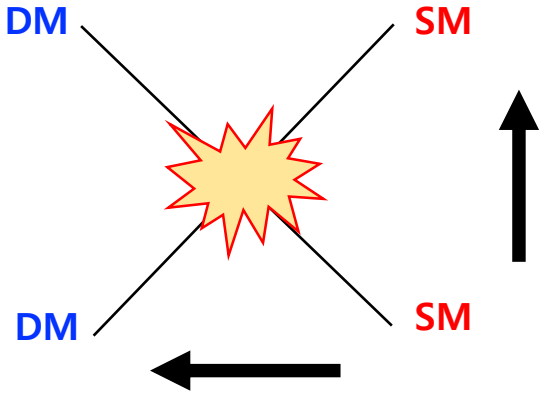


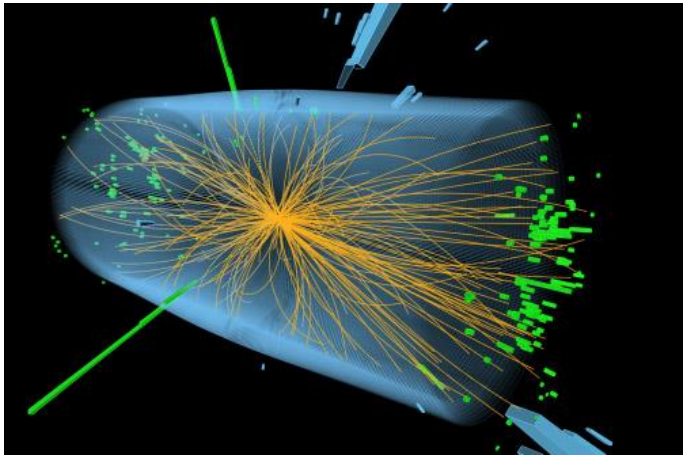


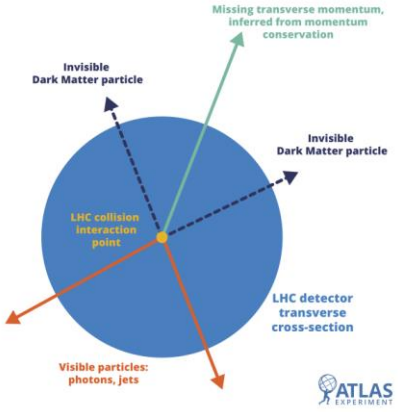
WIMP

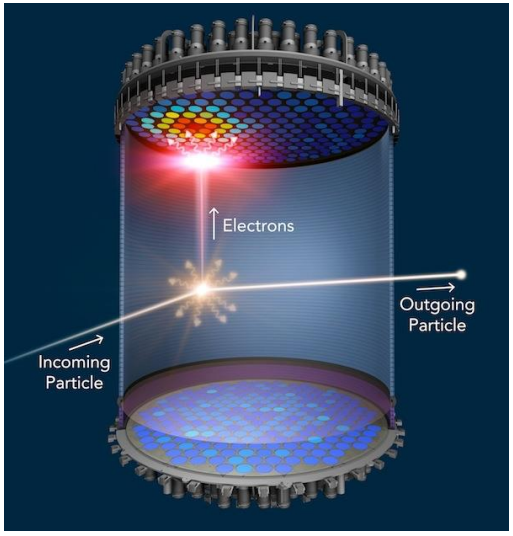
현재 우주에서 비록 중력적인 상호작용에 영향을 미칠 정도는 아니지만 필연적으로 밀도가 높은 은하 중심에서 여전히 쌍소멸을 할 수 있고, 지구 주변에 돌아다니는 암흑물질은 핵자, 전자와 (비) 탄성 충돌을 하게 된다. 또한 가속기에서 암흑물질을 생성시킬 수 있으므로 **이 모든 것이 동시에 검증된다면 아주 강력한 암흑물질 정체에 대한 증거**가 된다.









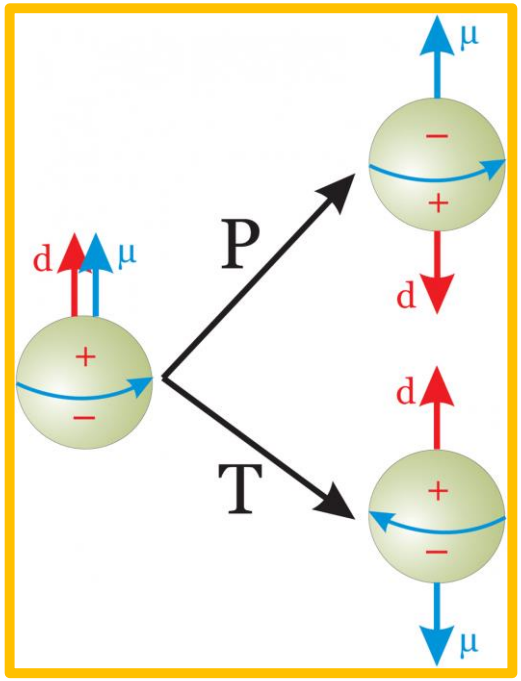


QCD Axion

QCD 액시온은 표준모형의 강한 CP 문제를 해결하기 위해 도입된 가상의 Pseudo-Scalar 보존이다.

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 + \frac{g_s^2}{32\pi^2}\frac{\phi}{f_a} G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu} + \frac{c_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

글루온 전기장, 자기장



$$H_{eff} \ni -\vec{S}_N \cdot \left(g_N \frac{e}{2m_N}\vec{B} + d_N \vec{E} \right)$$

$\mu_N = \frac{g_N e}{2m_N}$ = 중성자 자기쌍극자 모멘트

d_N = 중성자 전기쌍극자 모멘트

$d_N \approx 0$ ($|d_N| < 1.8 \times 10^{-26} e\ \mathrm{cm}$) 왜 강한 상호작용은 (약작용과 달리) CP 대칭적인가?

QCD Axion

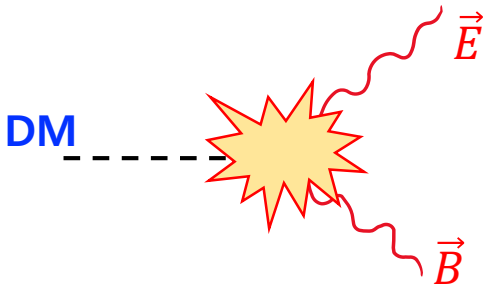
QCD 액시온은 표준모형의 강한 CP 문제를 해결하기 위해 도입된 가상의 Pseudo-Scalar 보존이다.

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 + \frac{g_s^2}{32\pi^2}\frac{\phi}{f_a} G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu} + \frac{c_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

글루온 전기장, 자기장

$$L_{eff} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2}m_a^2\phi^2 + \frac{\tilde{c}_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

$$m_a \simeq \mu\text{eV}\left(\frac{10^{12}\text{GeV}}{f_a}\right)$$



비록 액시온은 절대적으로 안정적이지 않고 두 광자로 붕괴할 수 있지만 가벼운 질량과 매우 약한 상호작용으로 인해 입자의 수명이 우주의 나이보다 훨씬 길다.

$$\tau_a \sim \left(\frac{m_a^3}{f_a^2}\right)^{-1} \sim 10^{47}\text{sec}\left(\frac{f_a}{10^{12}\text{GeV}}\right)^5 \gg \tau_U = 4.4\times 10^{17}\text{sec}$$

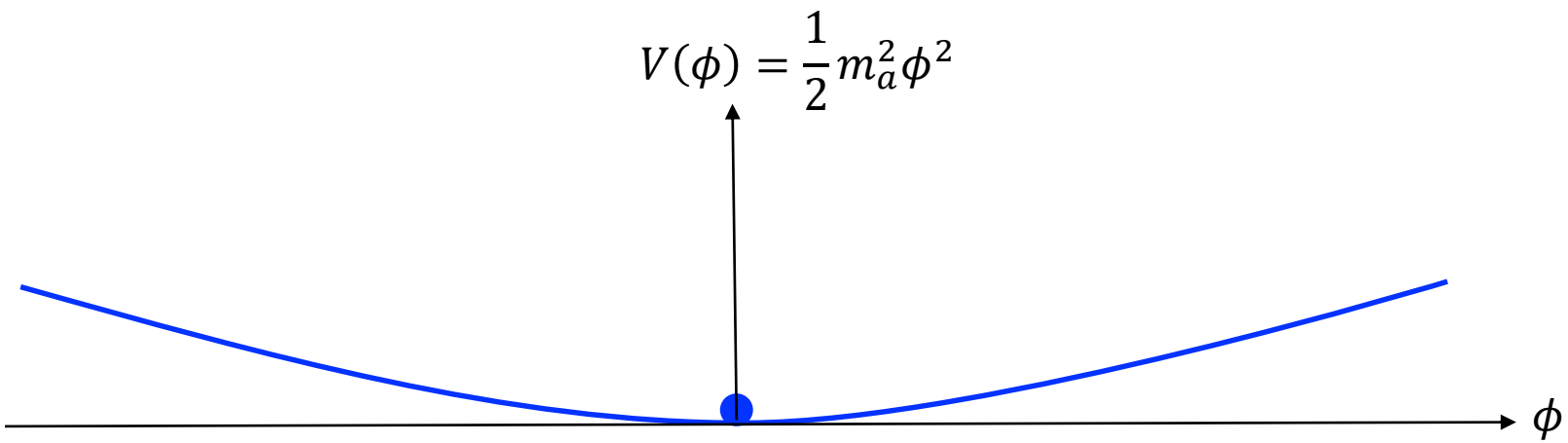
QCD Axion

QCD 액시온은 표준모형의 강한 CP 문제를 해결하기 위해 도입된 가상의 Pseudo-Scalar 보존이다.

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 + \frac{g_s^2}{32\pi^2}\frac{\phi}{f_a} G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu} + \frac{c_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

글루온 전기장, 자기장

$$L_{eff} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2}m_a^2\phi^2 + \frac{\tilde{c}_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$



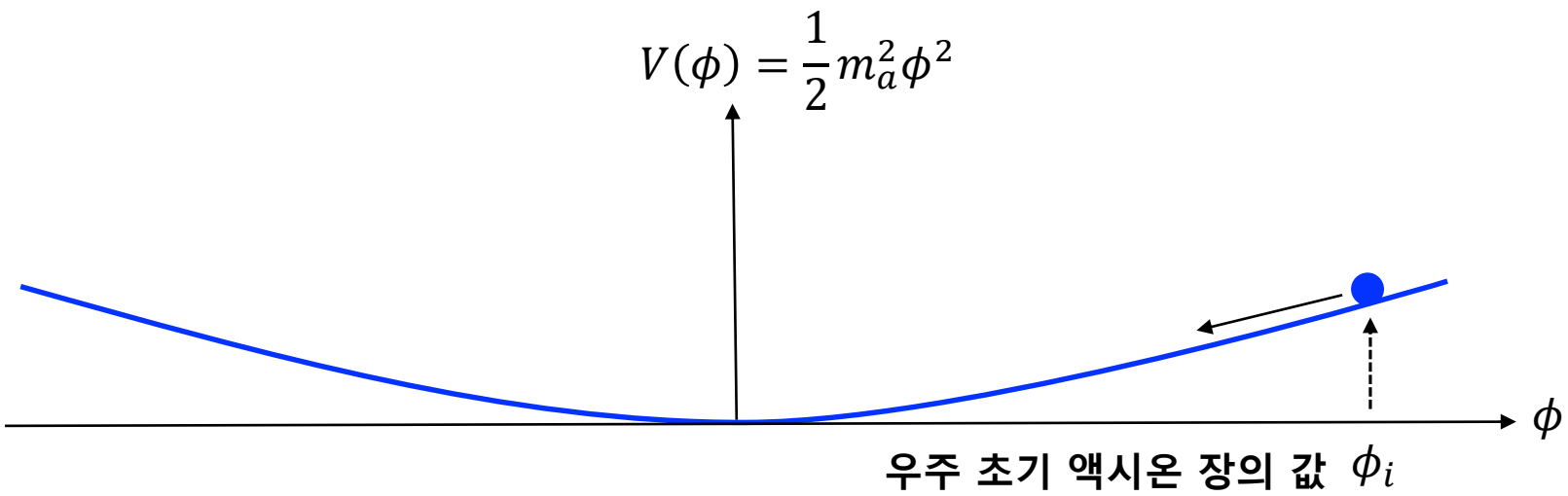
QCD Axion

QCD 액시온은 표준모형의 강한 CP 문제를 해결하기 위해 도입된 가상의 Pseudo-Scalar 보존이다.

$$L = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 + \frac{g_s^2}{32\pi^2}\frac{\phi}{f_a} G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu} + \frac{c_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

글루온 전기장, 자기장

$$L_{eff} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2}m_a^2\phi^2 + \frac{\tilde{c}_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

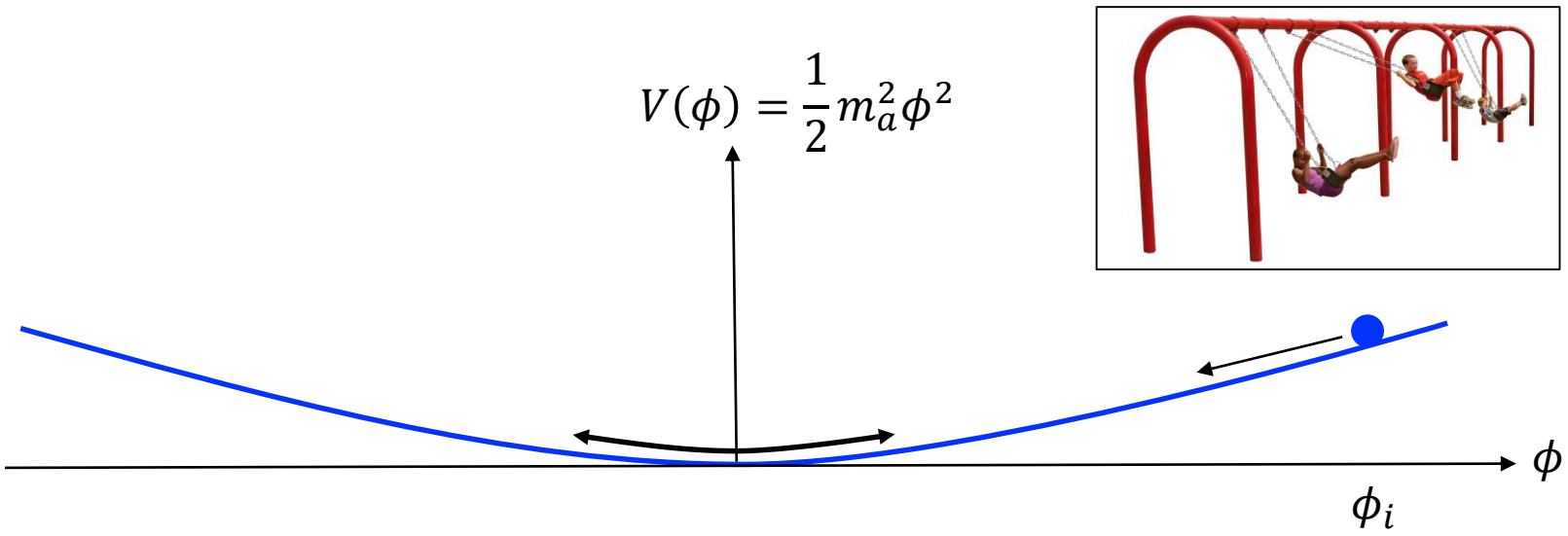


QCD Axion

초기 액시온 장이 공간적으로 매우 균일하게 분포하고, Coherent 한 Oscillation 이 이뤄지는 경우, 비록 액시온의 질량이 매우 작더라도 큰 스케일에서 차가운 암흑물질과 같은 형태로 움직임을 확인할 수 있다.

$$\ddot{\phi}(t) + 3H(t)\dot{\phi}(t) + m_a^2\phi(t) = 0 \qquad (H(t) = \text{주어진 시간에서의 허블 파라메터})$$

인플레이션 이후 이런 운동은 자연스러우며, 이것이 왜 암흑물질처럼 다뤄질 수 있는지는 우주론 강의에서 보충하도록 함



QCD Axion

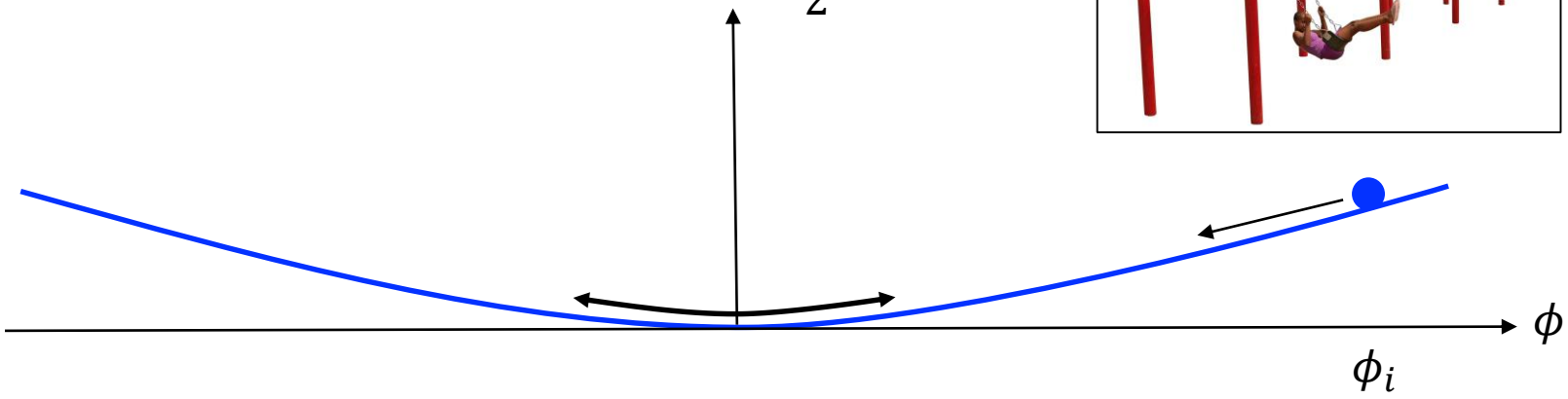
초기 액시온 장이 공간적으로 매우 균일하게 분포하고, Coherent 한 Oscillation 이 이뤄지는 경우, 비록 액시온의 질량이 매우 작더라도 큰 스케일에서 차가운 암흑물질과 같은 형태로 움직임을 확인할 수 있다.

$$\ddot{\phi}(t) + 3H(t)\dot{\phi}(t) + m_a^2\phi(t) = 0 \qquad (H(t) = \text{주어진 시간에서의 허블 파라메터})$$

인플레이션 이후 이런 운동은 자연스러우며, 이것이 왜 암흑물질처럼 다뤄질 수 있는지는 우주론 강의에서 보충하도록 함

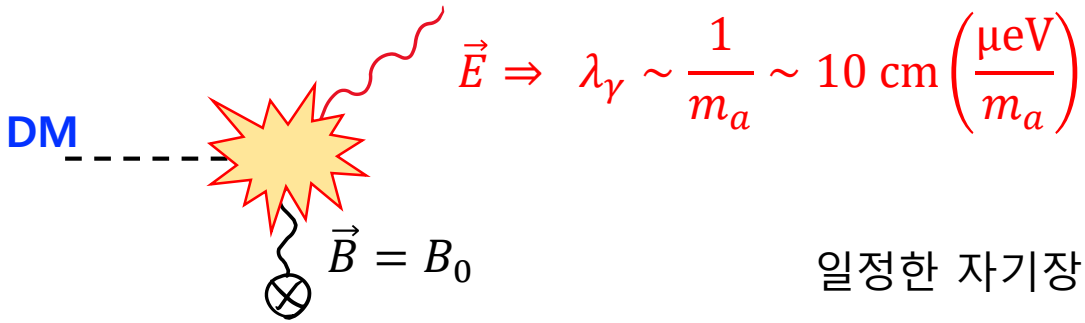
$$\left(\frac{\rho_{\mathrm{DM}}}{\rho_{tot}}\right) \simeq 0.25\left(\frac{f_a}{10^{12}\mathrm{GeV}}\right)^{\frac{7}{6}}\left(\frac{\phi_i}{f_a}\right)$$





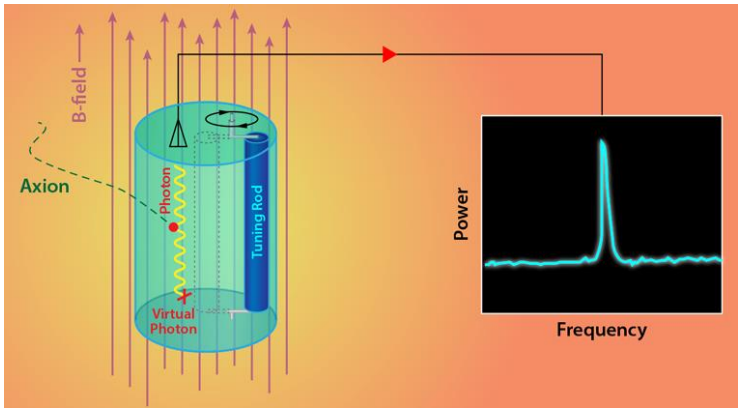
QCD Axion

액시온 암흑물질이 실제 자연을 이룬다면 액시온 디케이 상수인 f_a 는 $10^{11} - 10^{12}\text{GeV}$ 가 자연스럽게 선호된다. 이러한 영역에 대한 액시온을 검증하기 위한 실험을 수행 중에 있다.



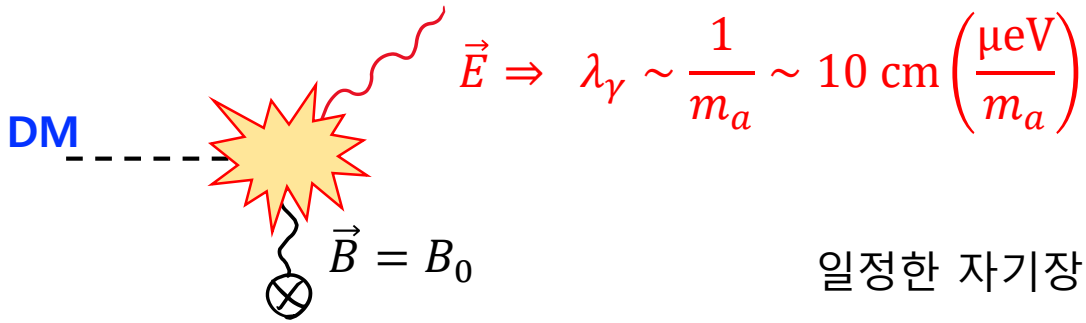
$$\frac{\tilde{c}_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B} = g_{a\gamma\gamma}\phi\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

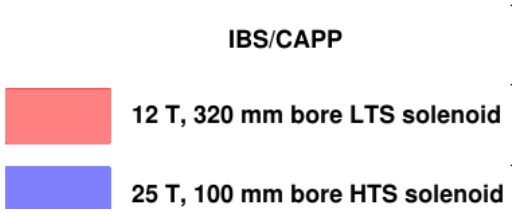
일정한 자기장 내에 놓여있는 액시온 암흑물질이 빛으로 변환될 때 Resonant cavity 를 활용하여 그 시그널을 증폭시켜 검출할 수 있다.



QCD Axion

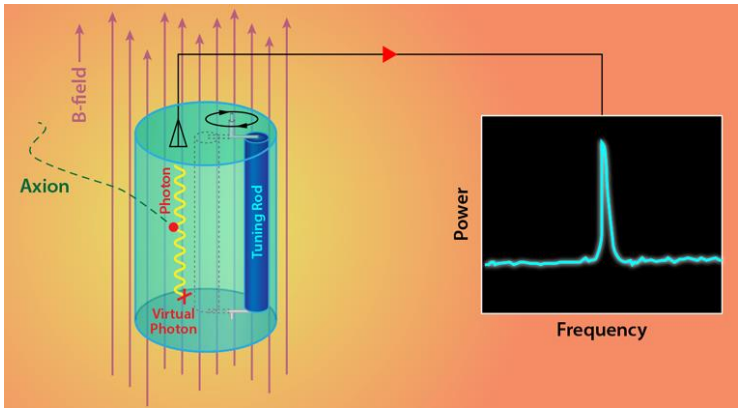
액시온 암흑물질이 실제 자연을 이룬다면 액시온 디케이 상수인 f_a 는 $10^{11} - 10^{12}\mathrm{GeV}$ 가 자연스럽게 선호된다. 이러한 영역에 대한 액시온을 검증하기 위한 실험을 수행 중에 있다.

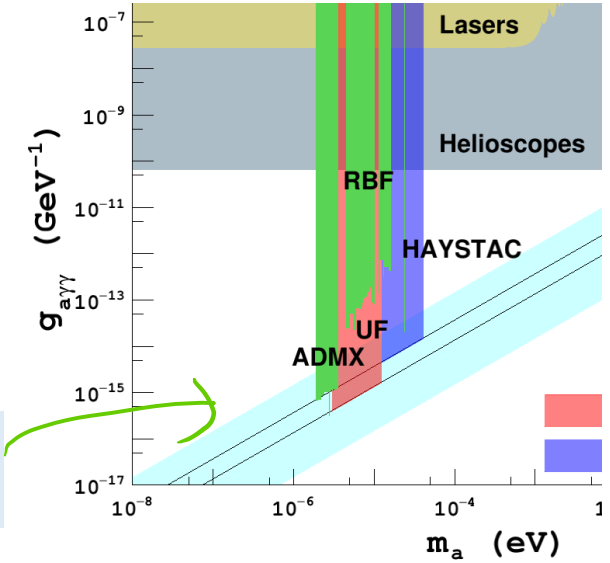




$$\frac{\tilde{c}_\gamma e^2}{16\pi^2}\frac{\phi}{f_a}\,\vec{E}\cdot\vec{B} = g_{a\gamma\gamma}\phi\,\vec{E}\cdot\vec{B}$$

일정한 자기장 내에 놓여있는 액시온 암흑물질이 빛으로 변환될 때 Resonant cavity 를 활용하여 그 시그널을 증폭시켜 검출할 수 있다.

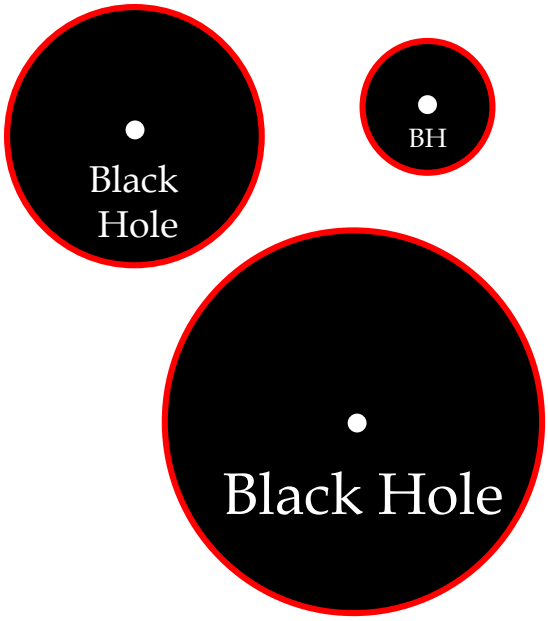




QCD 액시온 암흑물질

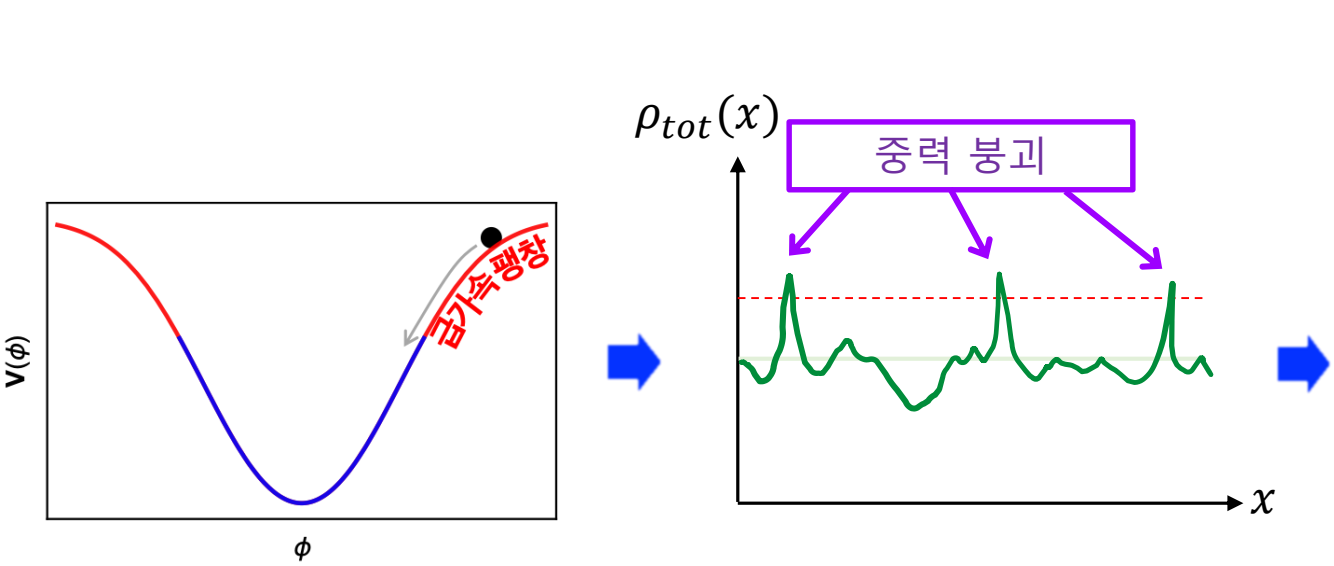
PBH

원시 블랙홀은 현 시점에서는 MACHO 의 일부로 볼 수 있으나 우주의 구조가 생성되기 전에 이미 생성되어 암흑물질의 일부를 이루는 천체이다. (즉 별의 진화의 끝에 도달한 블랙홀이 아님). **초기 우주 어떤 작은 스케일의 밀도요동이 확률적으로 매우 커질 수 있고 이러한 요동은 먼저 중력붕괴를 일으켜 특정 질량의 블랙홀의 생성으로 이어진다.**



PBH

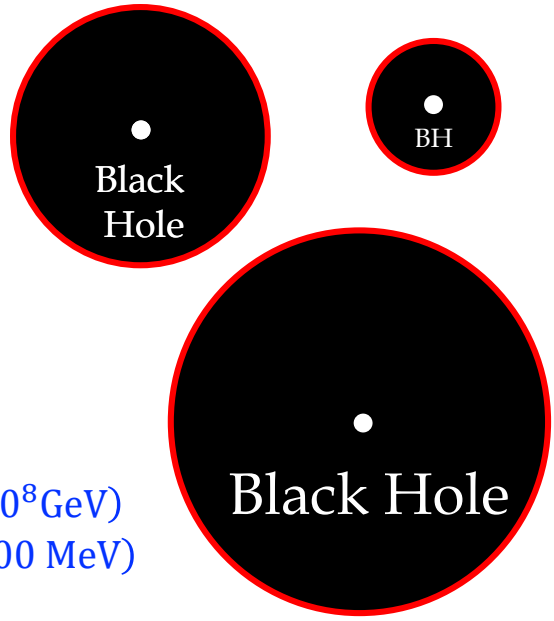
원시 블랙홀은 현 시점에서는 MACHO 의 일부로 볼 수 있으나 우주의 구조가 생성되기 전에 이미 생성되어 암흑물질의 일부를 이루는 천체이다. (즉 별의 진화의 끝에 도달한 블랙홀이 아님). **초기 우주 어떤 작은 스케일의 밀도요동이 확률적으로 매우 커질 수 있고 이러한 요동은 먼저 중력붕괴를 일으켜 특정 질량의 블랙홀의 생성으로 이어진다.**



e.g.) 인플라톤 장의 운동에 의해 유발된 초기 우주 밀도 요동 ➡ 원시 블랙홀 생성

PBH

원시 블랙홀은 현 시점에서는 MACHO 의 일부로 볼 수 있으나 우주의 구조가 생성되기 전에 이미 생성되어 암흑물질의 일부를 이루는 천체이다. (즉 별의 진화의 끝에 도달한 블랙홀이 아님). **초기 우주 어떤 작은 스케일의 밀도요동이 확률적으로 매우 커질 수 있고 이러한 요동은 먼저 중력붕괴를 일으켜 특정 질량의 블랙홀의 생성으로 이어진다.**



블랙홀의 형성시간이 곧 블랙홀의 질량을 결정한다.

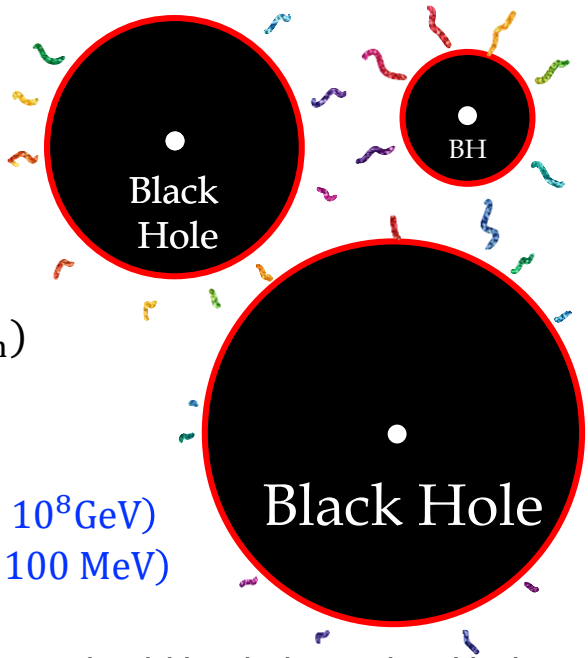
$$\rho_{PBH} = \frac{M_{PBH}}{\frac{4\pi}{3}R_{BH}^3} = \frac{3}{32\pi G^3 M_{PBH}^2} = \rho_{tot}(t_{\text{form}})$$

$M_{PBH} = 5 \times 10^{-19} M_\odot$ $(t_{\text{form}} = 10^{-23}\text{sec}, \quad T \sim 10^8 \text{GeV})$

$= M_\odot$ $(t_{\text{form}} = 10^{-5}\text{sec}, \quad T \sim 100\ \text{MeV})$

PBH

원시 블랙홀은 현 시점에서는 MACHO 의 일부로 볼 수 있으나 우주의 구조가 생성되기 전에 이미 생성되어 암흑물질의 일부를 이루는 천체이다. (즉 별의 진화의 끝에 도달한 블랙홀이 아님). **초기 우주 어떤 작은 스케일의 밀도요동이 확률적으로 매우 커질 수 있고 이러한 요동은 먼저 중력붕괴를 일으켜 특정 질량의 블랙홀의 생성으로 이어진다.**



블랙홀의 형성시간이 곧 블랙홀의 질량을 결정한다.

$$\rho_{PBH} = \frac{M_{PBH}}{\frac{4\pi}{3}R_{BH}^3} = \frac{3}{32\pi G^3 M_{PBH}^2} = \rho_{tot}(t_{\text{form}})$$

$M_{PBH} = 5 \times 10^{-19} M_\odot$ $(t_{\text{form}} = 10^{-23}\text{sec}, \quad T \sim 10^8 \text{GeV})$

$= M_\odot$ $(t_{\text{form}} = 10^{-5}\text{sec}, \quad T \sim 100\ \text{MeV})$

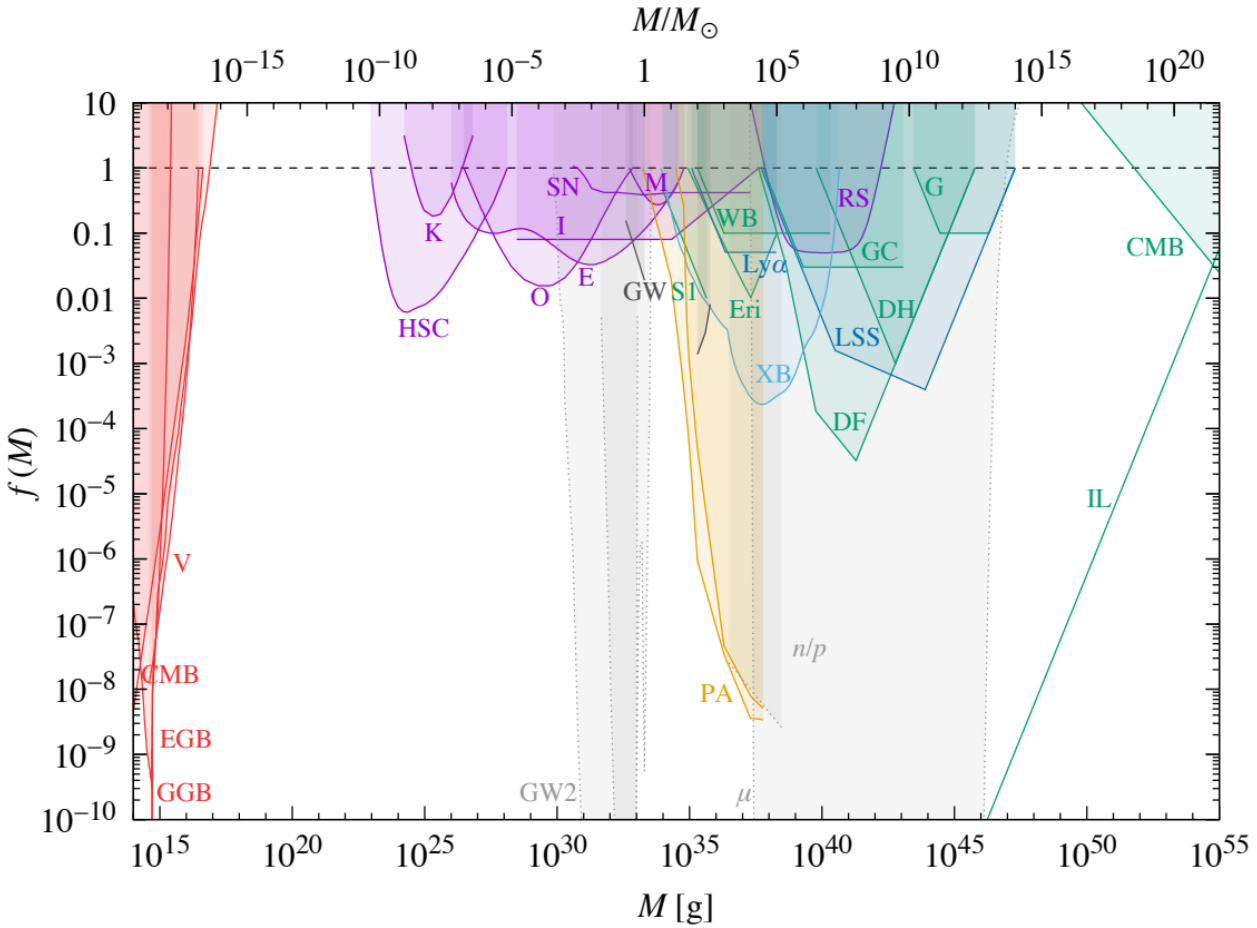
또한 호킹 복사에 의해서 블랙홀의 수명이 정해지고 이는 암흑물질 PBH에 대한 제약을 제공한다.

$$\tau_{PBH} = 10^4 \text{Gyr} \left(\frac{M_{PBH}}{10^{-17} M_\odot} \right)^3$$

PBH

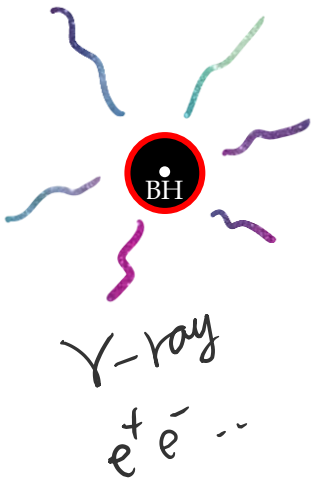
현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

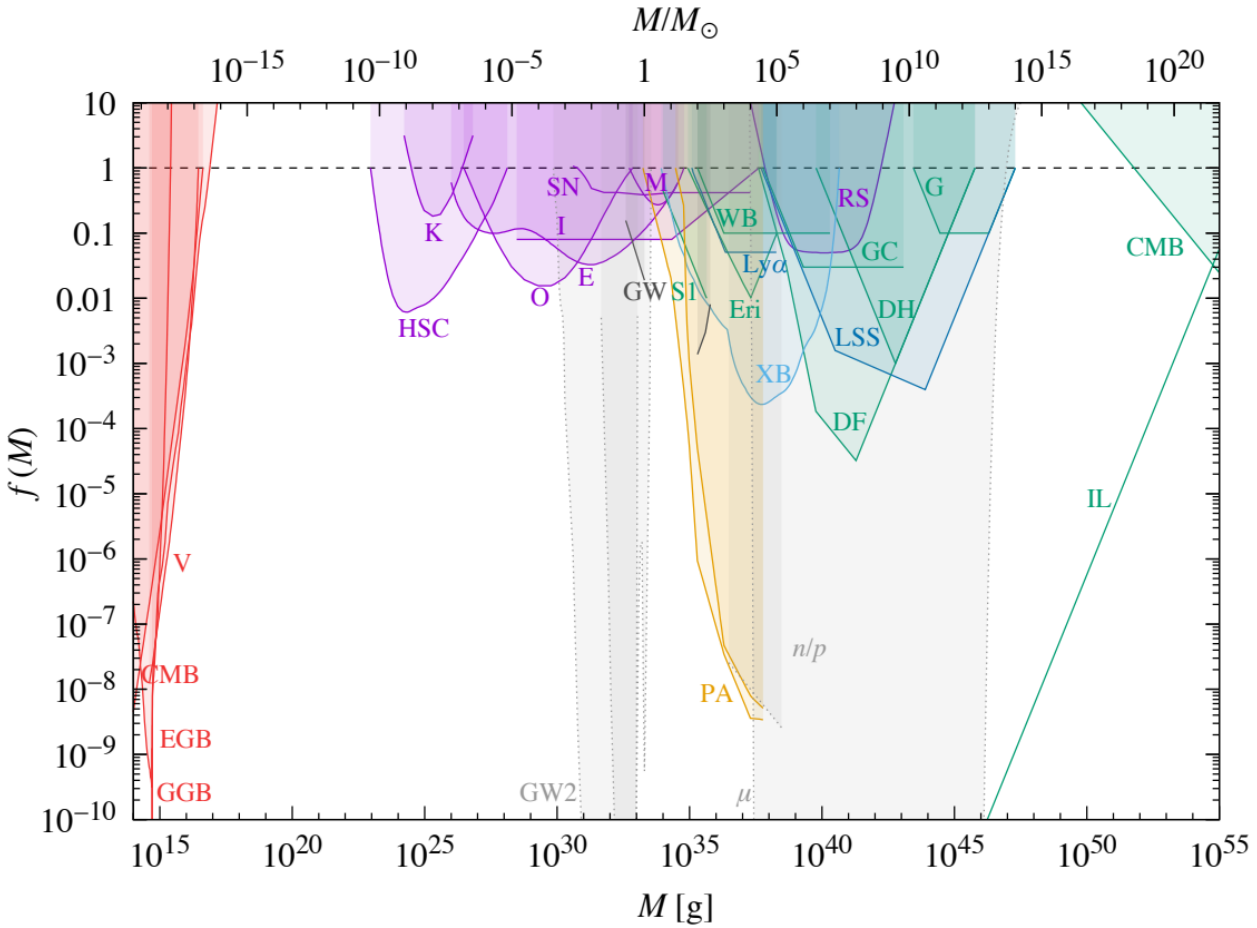
$$f(M) = \frac{\rho_{PBM}}{\rho_{DM}}$$



PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

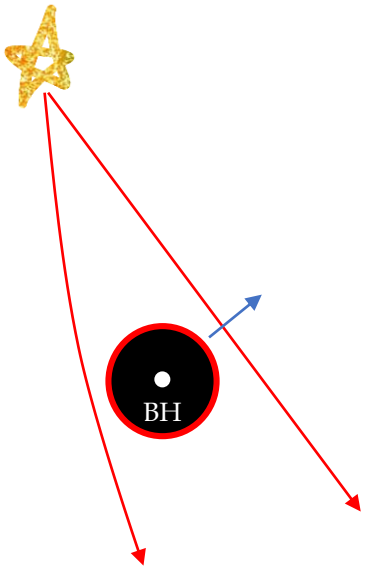


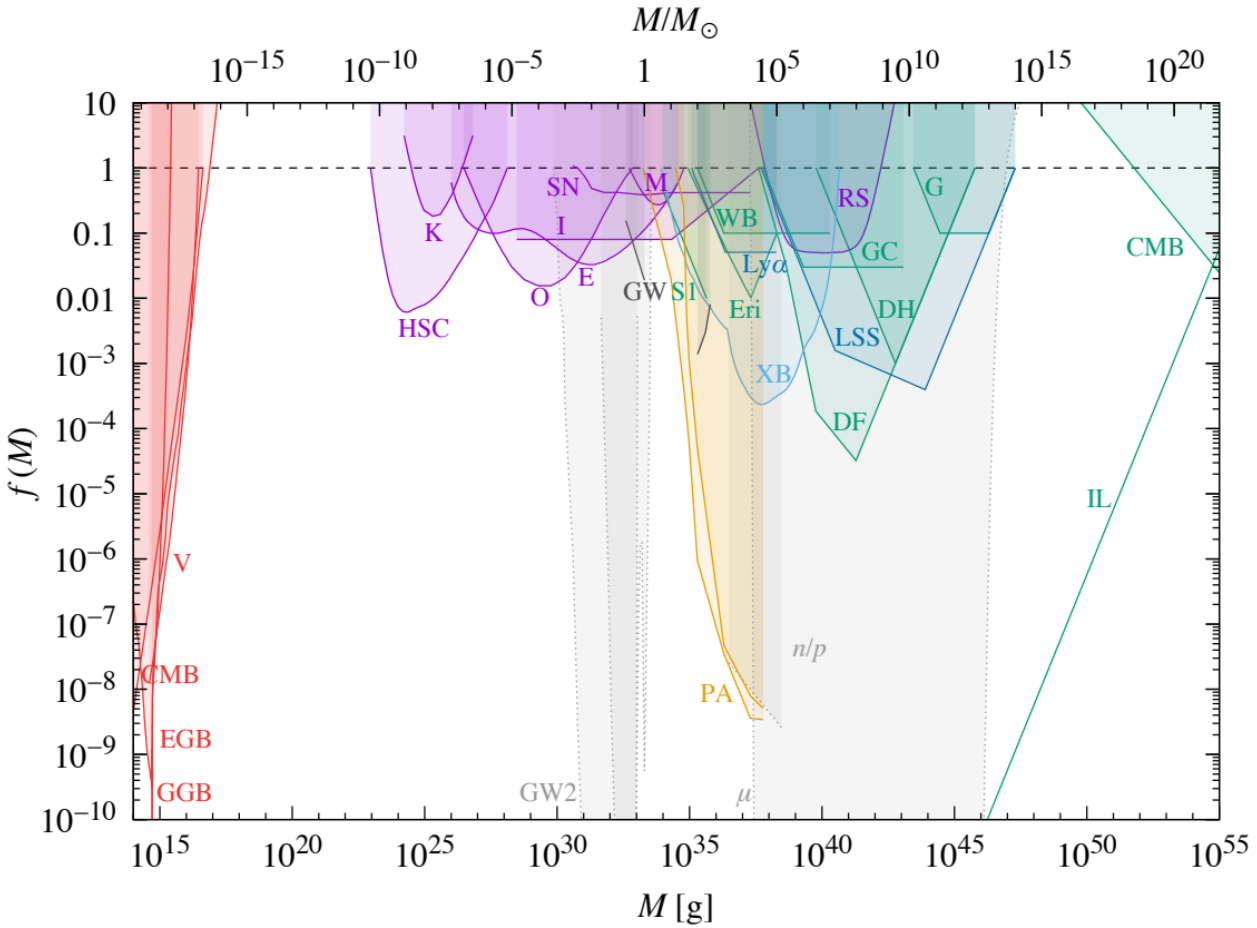


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

Microlensing

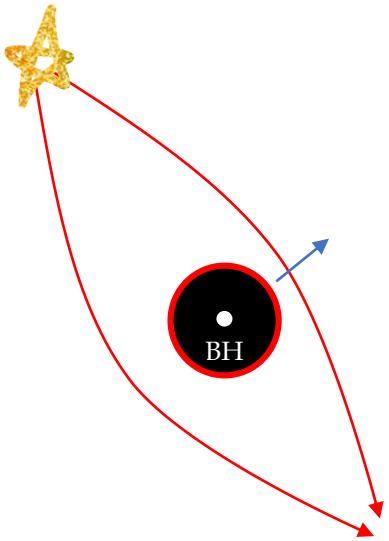


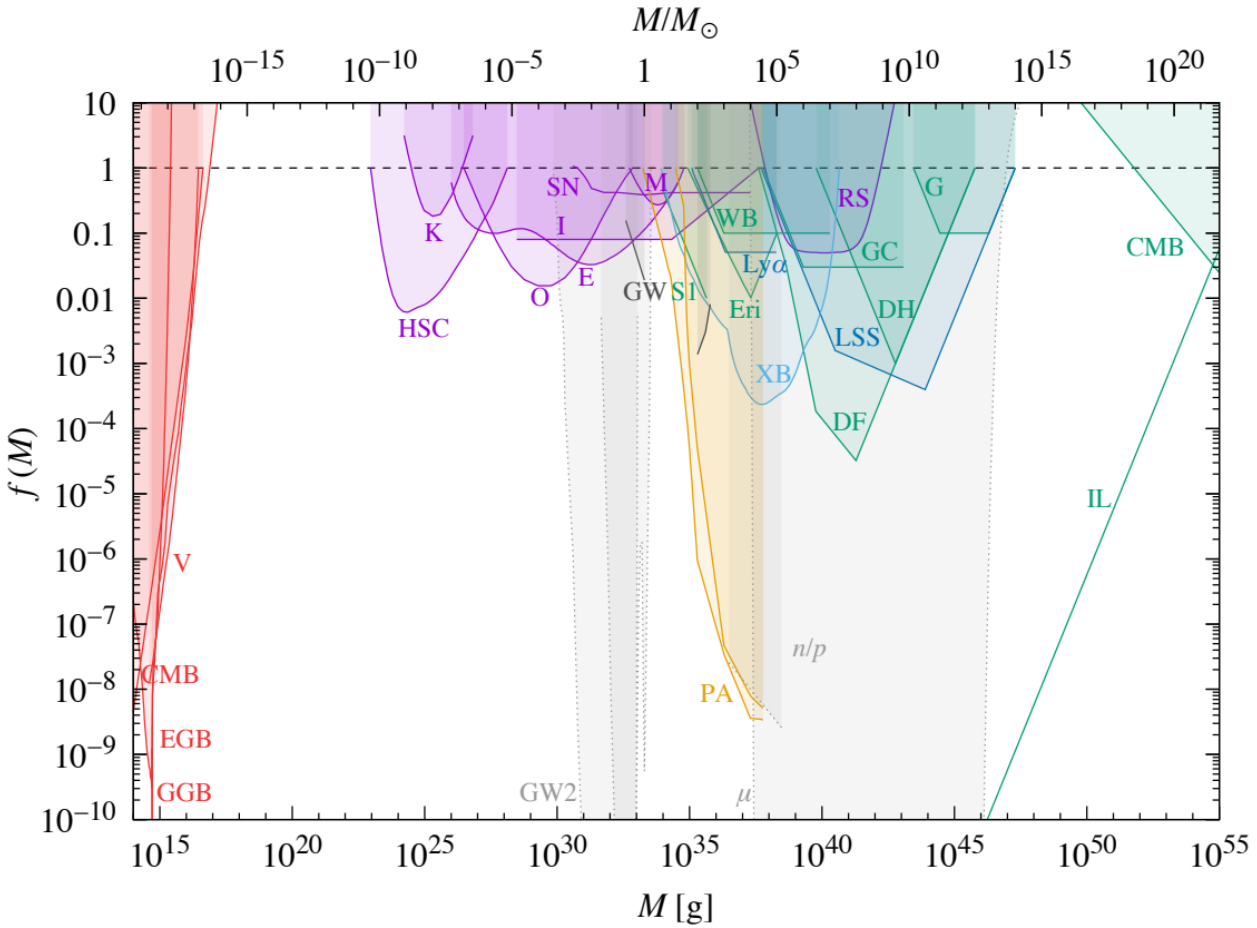


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

Microlensing

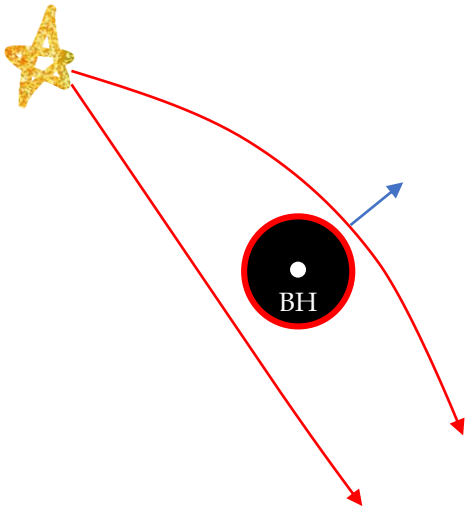


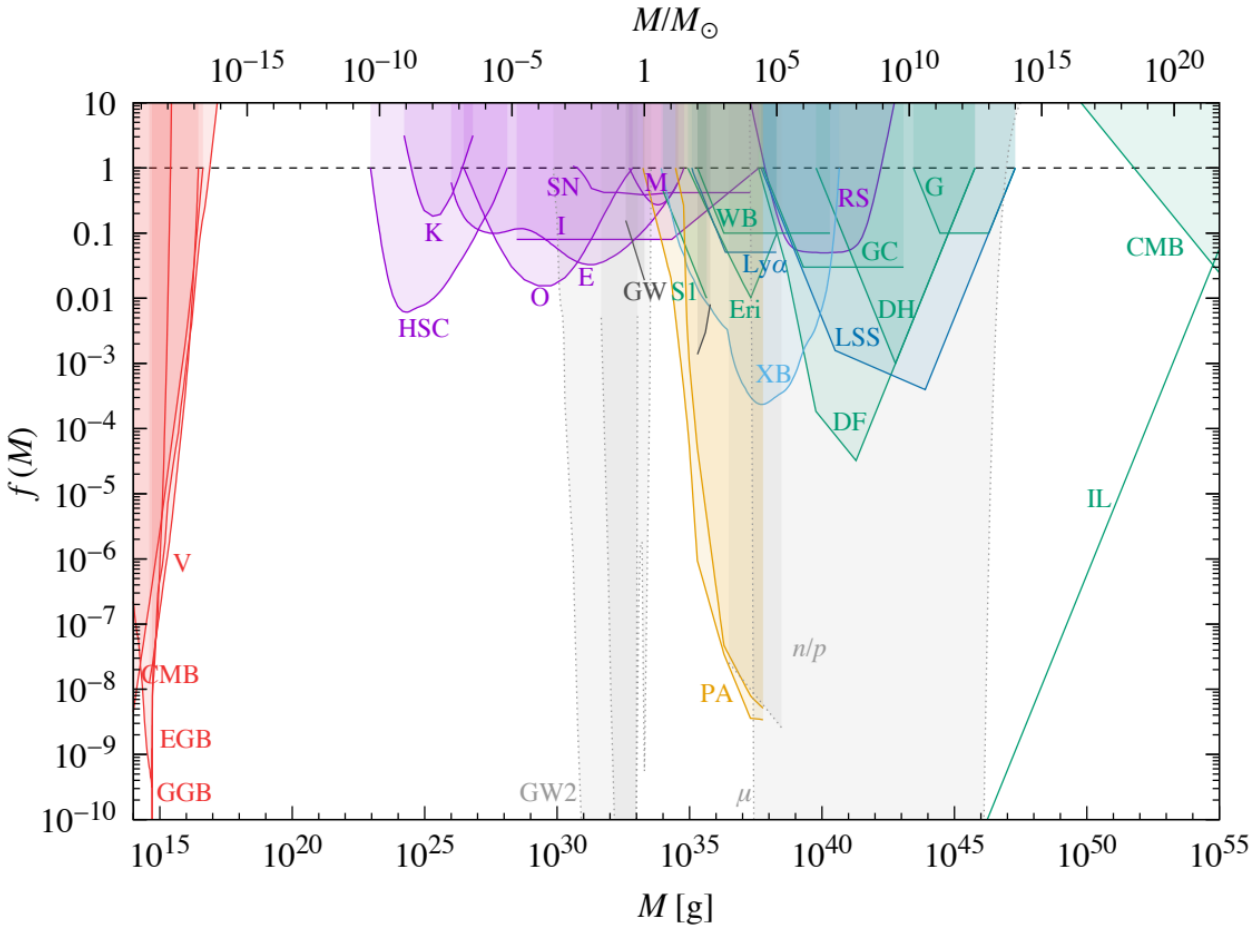


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

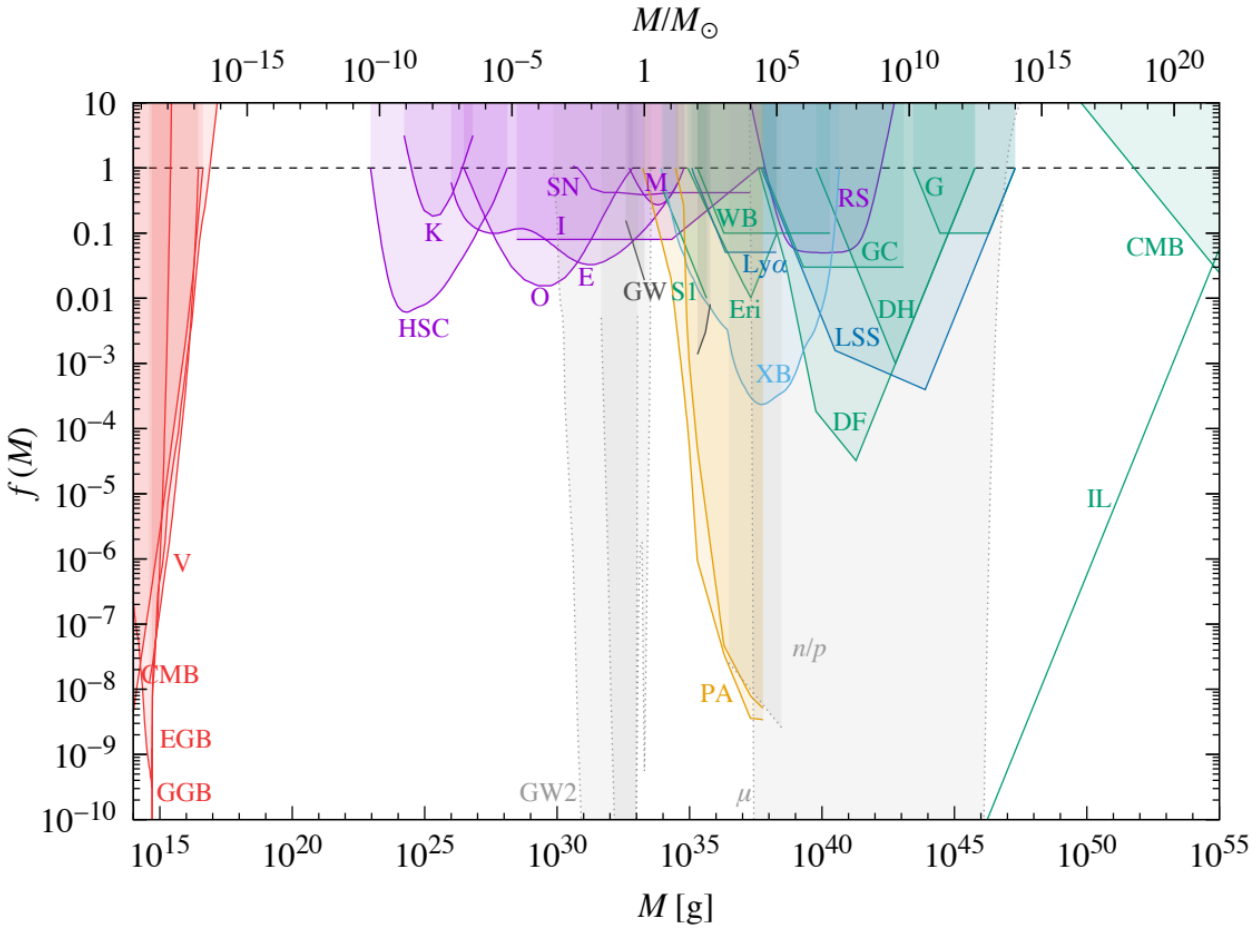
Microlensing



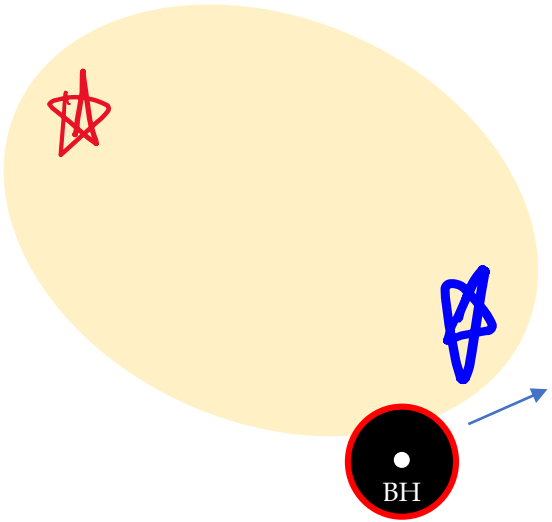


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

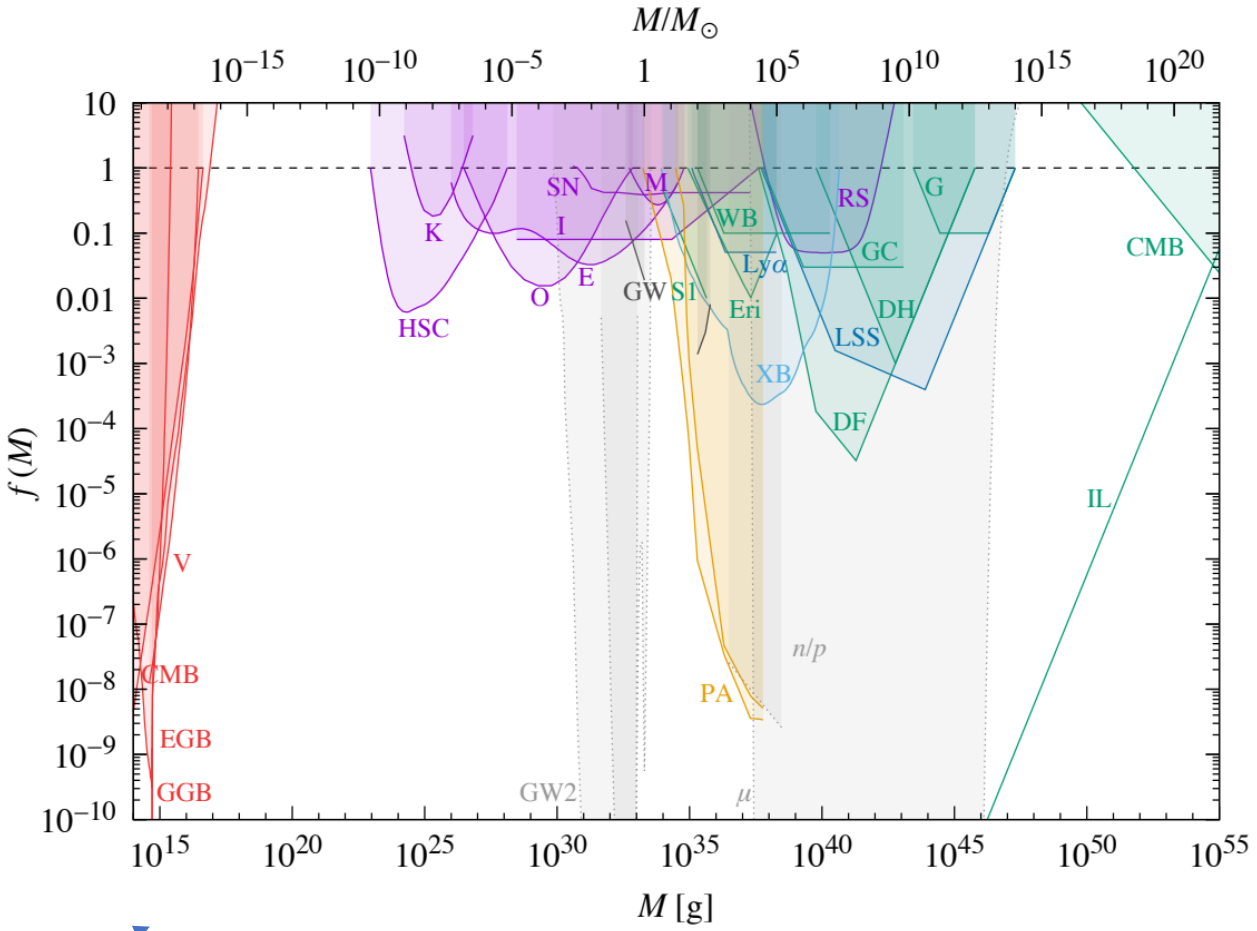


Destroy Wide Binary (WB) star systems

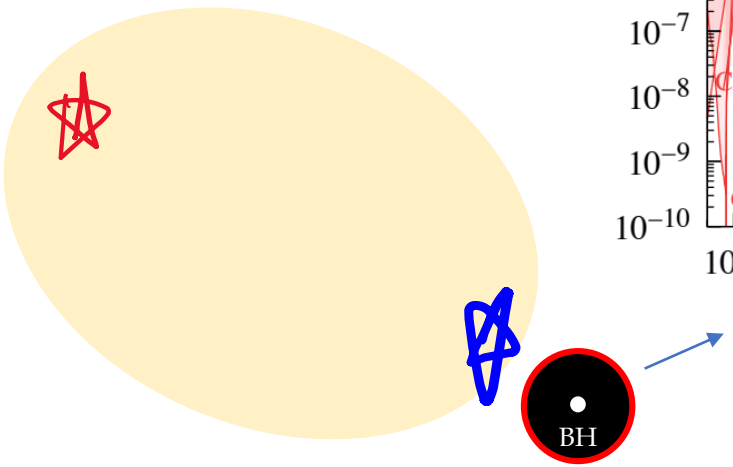


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

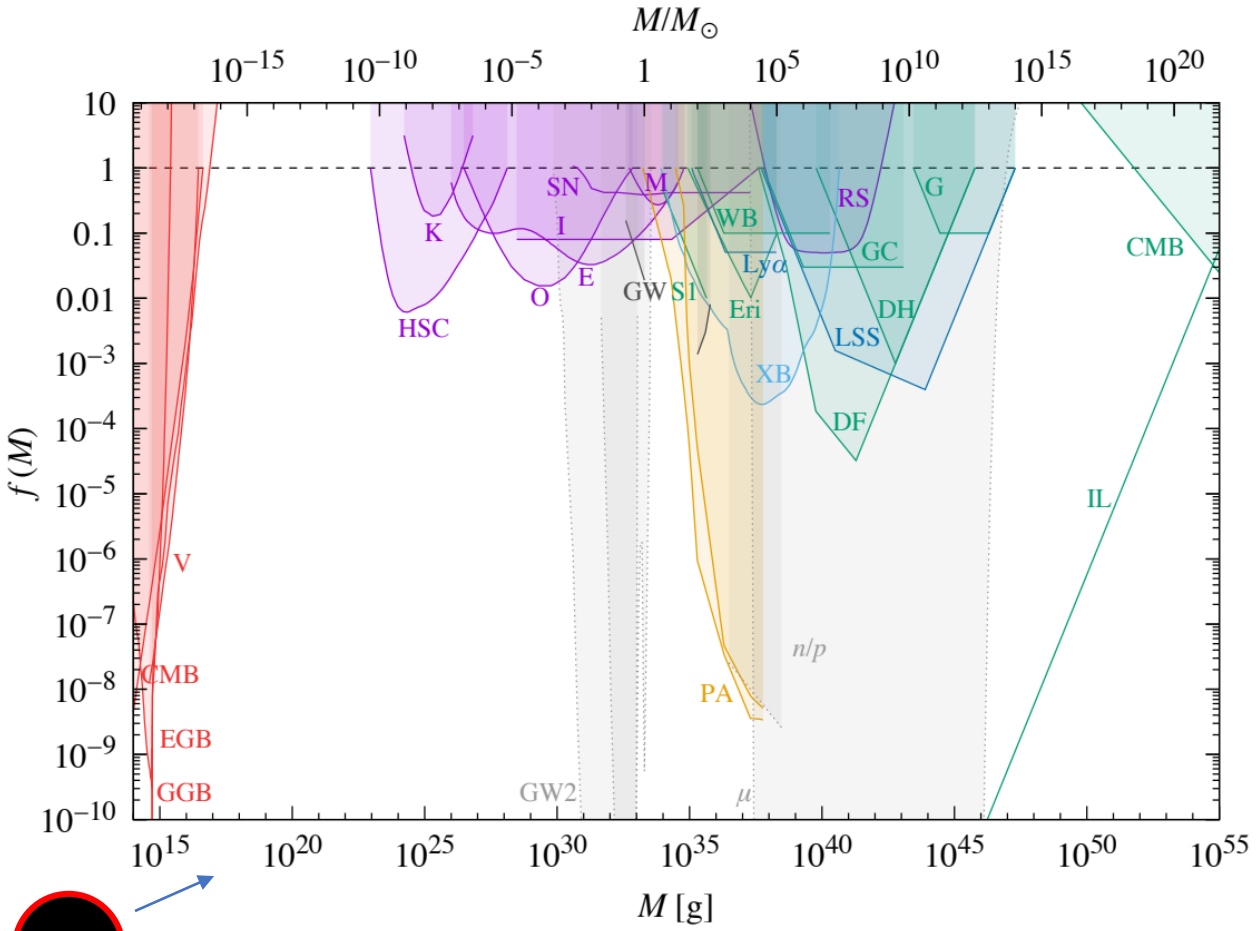


Destroy Wide Binary (WB) star systems

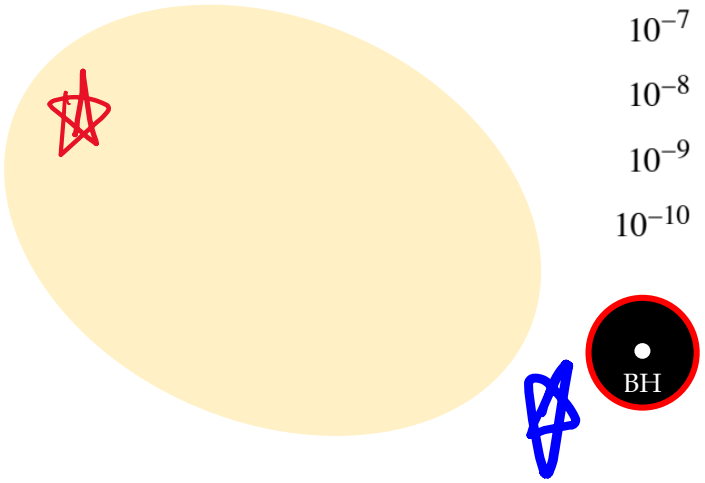


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.



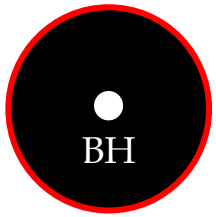
Destroy Wide Binary (WB) star systems

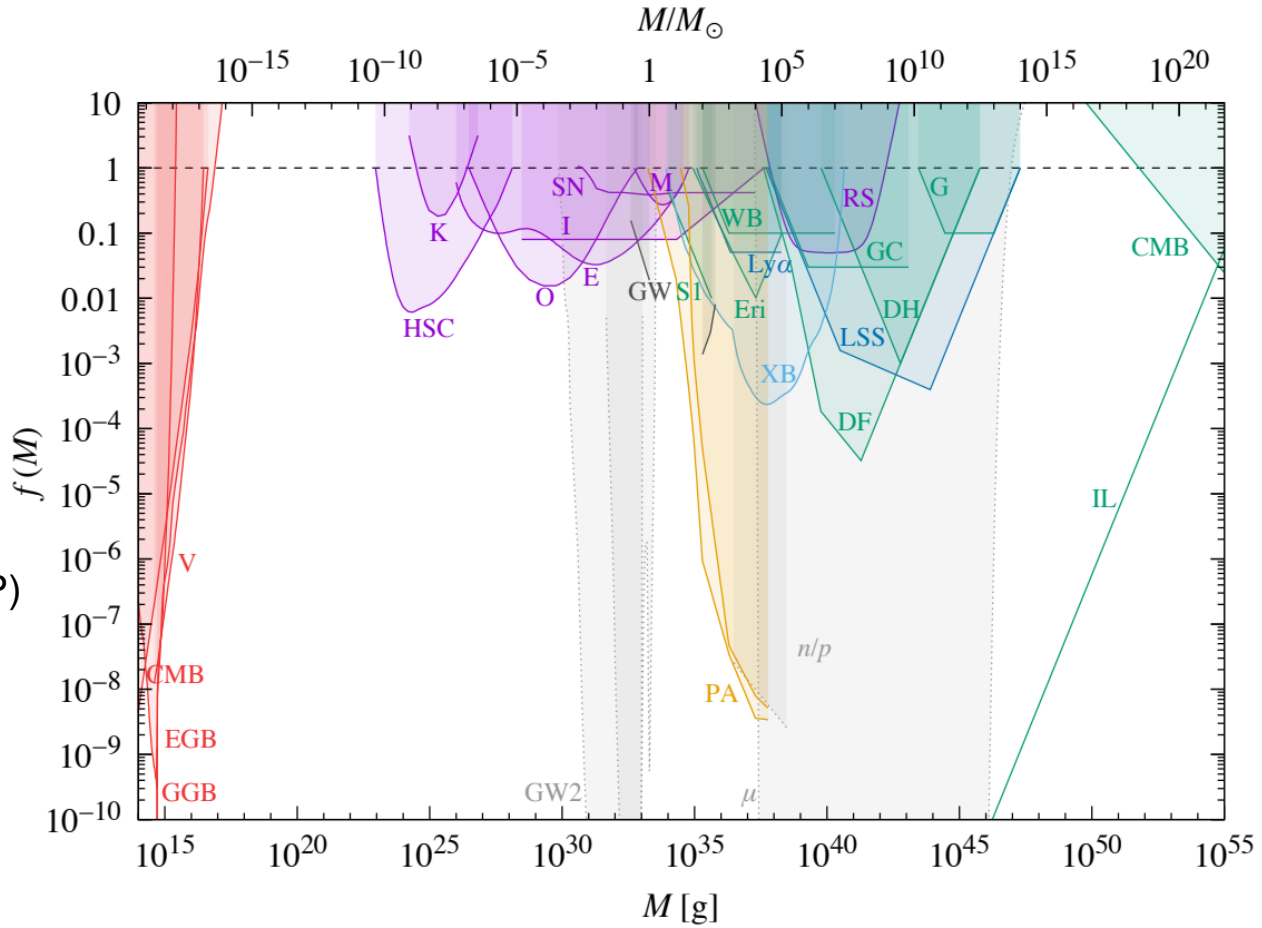


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

PBH accretion → X-rays
→ CMB distortion (FIRAS, WMAP)

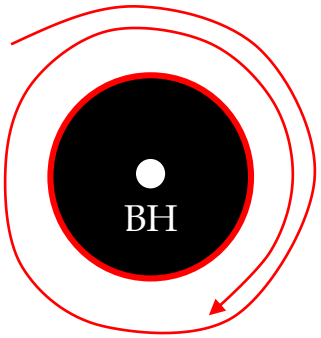


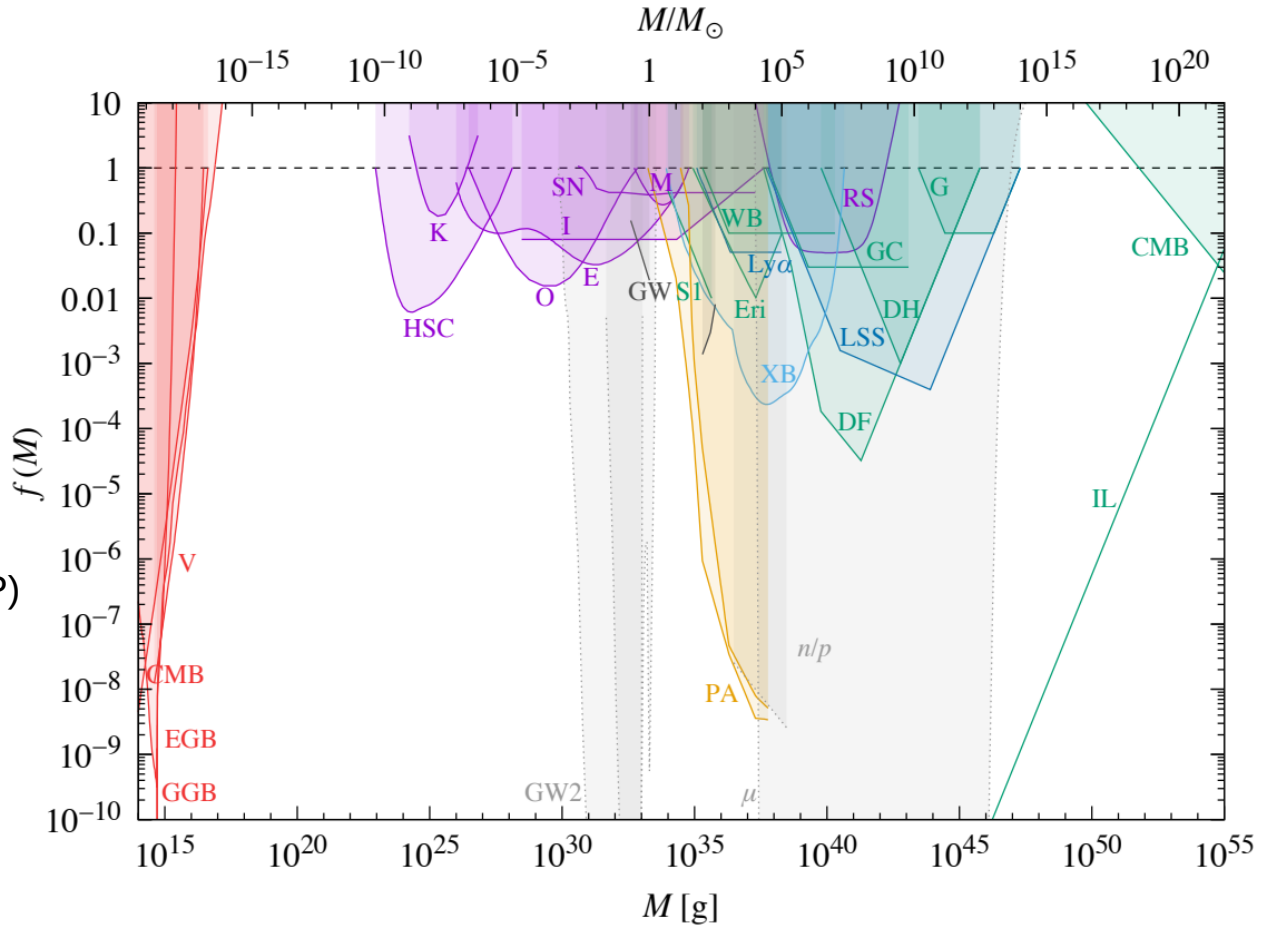


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

PBH accretion → X-rays
→ CMB distortion (FIRAS, WMAP)

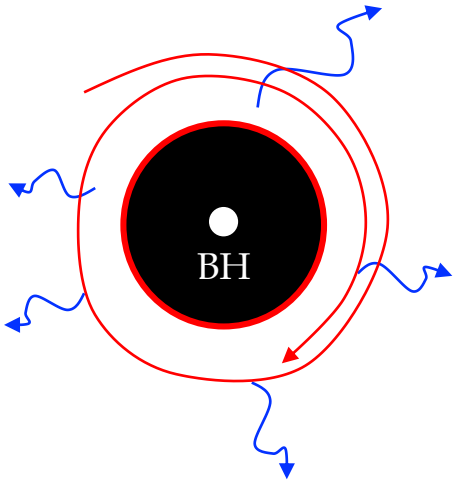


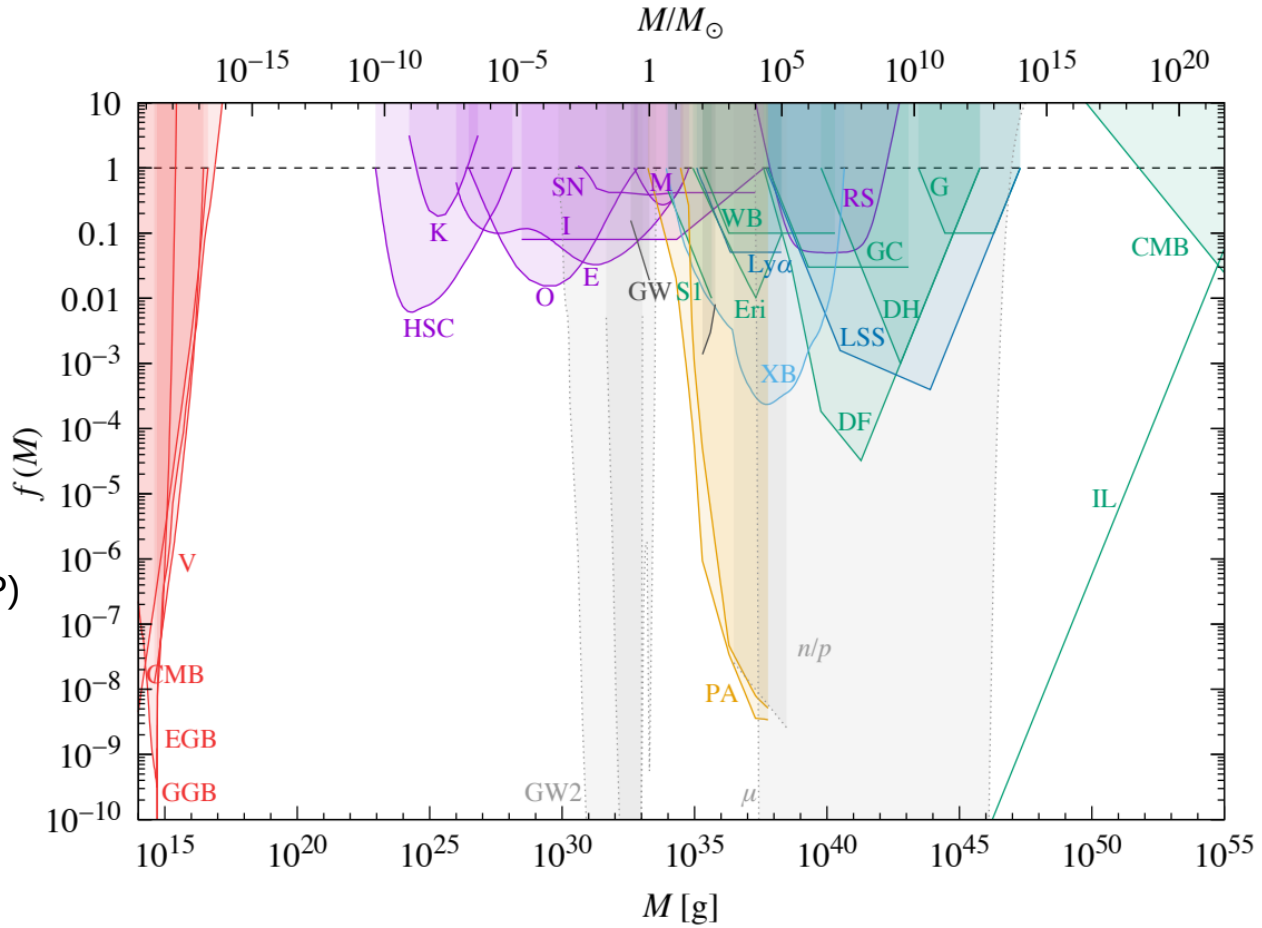


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

PBH accretion → X-rays
→ CMB distortion (FIRAS, WMAP)

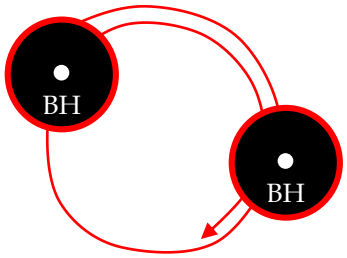


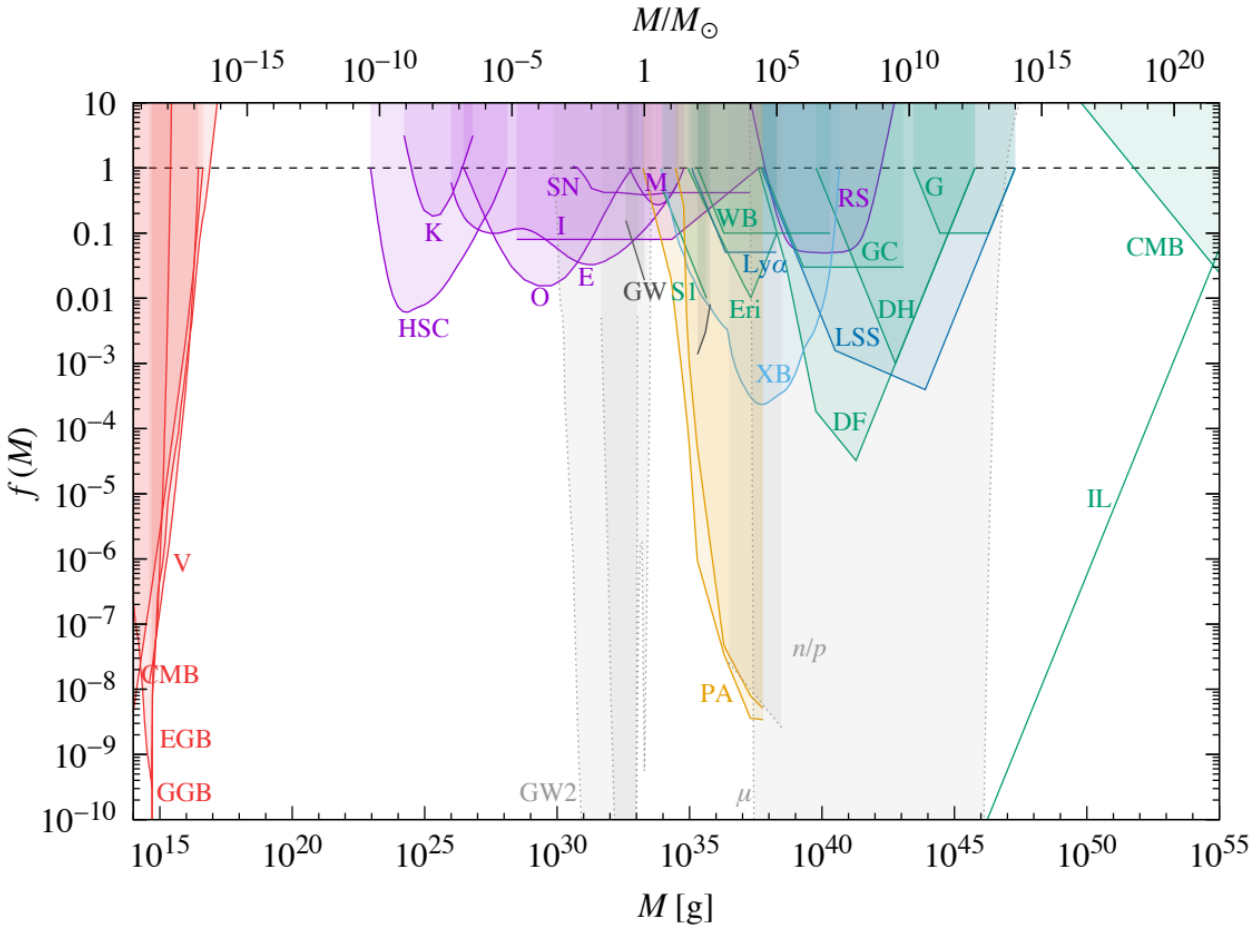


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.

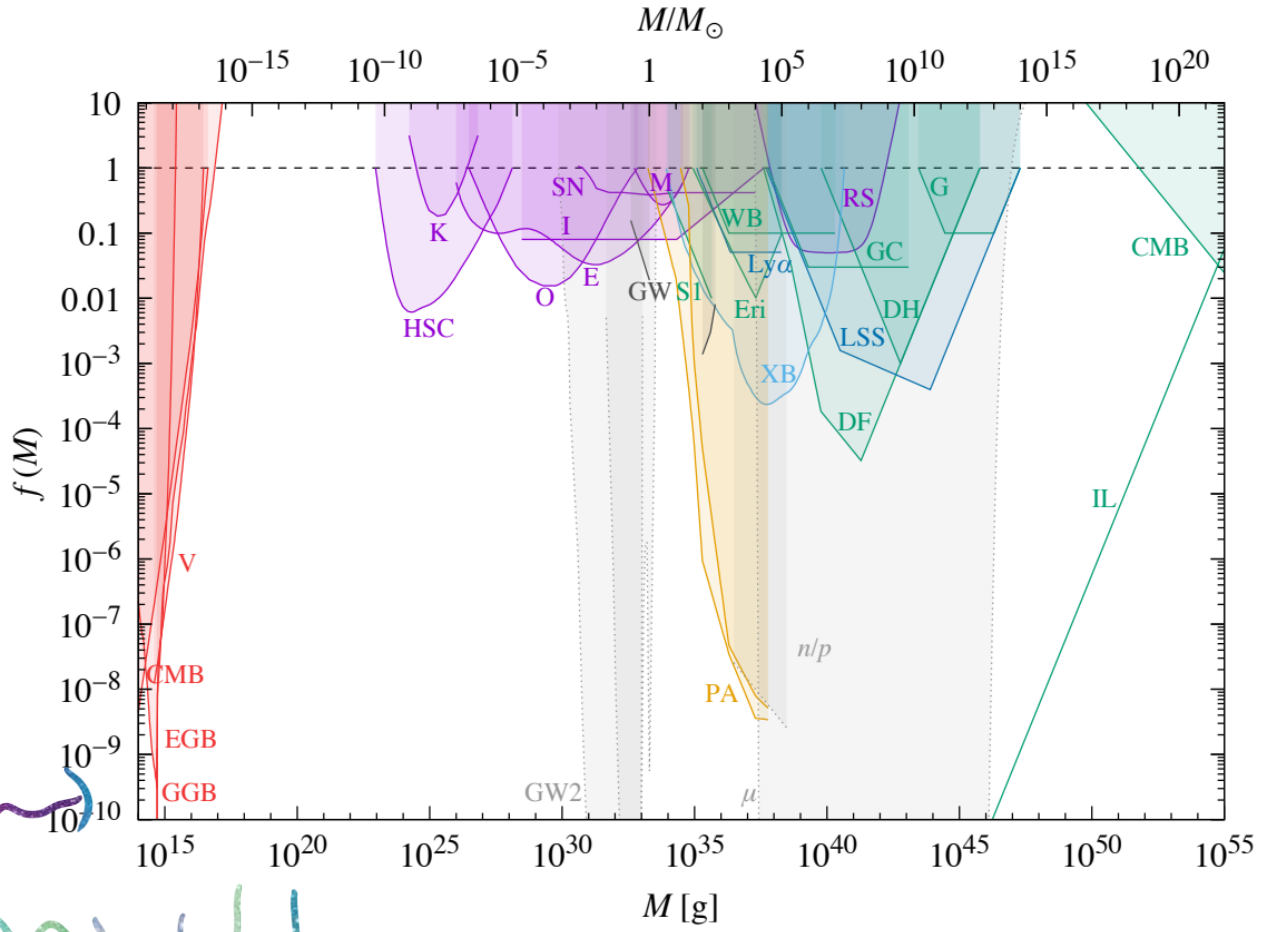
Binary PBHs (and merging)
the source of strong
Gravitational Waves



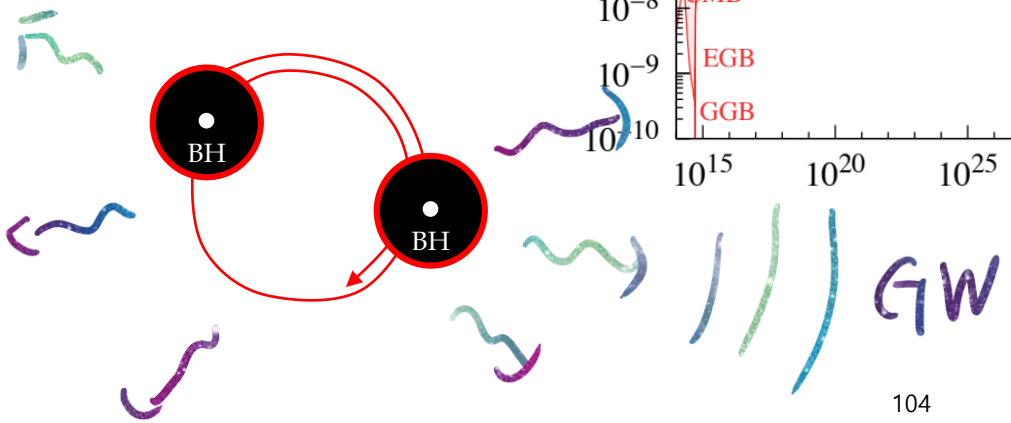


PBH

현재 원시블랙홀에 대한 탐구는 가벼운 영역에서는 호킹 복사의 흔적을 확인하는 노력과, 무거운 영역에서는 강한 중력에 의한 효과를 살펴보는 두가지 방식으로 이뤄지고 있다.



Binary PBHs (and merging) the source of strong Gravitational Waves



마무리...

암흑물질의 정체는 여전히 암흑세계에 있다.

몇가지 대표적인 암흑물질 후보들을 살펴봤지만, 본질적으로 우리의 편견과 기술 수준으로 제한되어 있는 면이 매우 크다.

더 깊은 이론적 통찰과 더 발달된 탐색 기술의 개발로 지금까지 보지 못했던 이론적 세계와 실제 세계를 탐구하면서 암흑물질의 정체에 대한 우리의 이해를 높이기 위해 더욱 노력해야할 시점이다.

Q&A