

# 슈바르츠실트 블랙홀 근처에서 방출선 형성 시뮬레이션

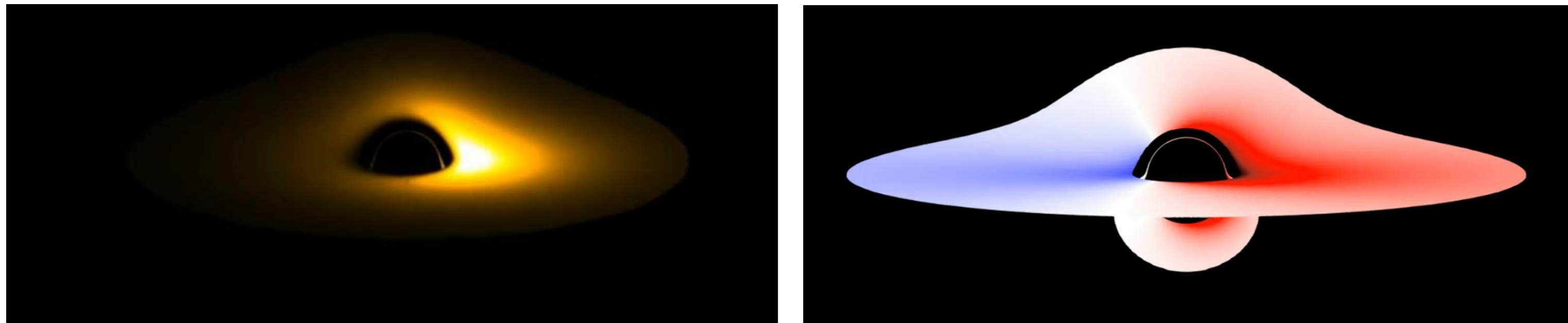
최보은(Bo-Eun Choi), 이희원(Hee-Won Lee)

## 1. 연구의 중요성

- 블랙홀은 그 존재를 관측적으로 증명하기 힘들었지만, X-ray를 내는 근접 쌍성계 조사를 통하여 블랙홀 후보 천체들을 찾을 수 있었다. 또한, 우리 은하 중심에 있는 Sagittarius A\*와 같이 은하 중심에는 거대질량 블랙홀이 있다는 것을 알게 되었고, 이제는 중력파 검출로 블랙홀-블랙홀 쌍성계도 관측하였다. 따라서 우리 우주에는 블랙홀이 아주 많다는 것을 밝혔다.
- 블랙홀의 X-ray 관측이 가능하게 되며 그 관측자료를 예측하고 해석하는 것은 굉장히 중요해졌다. 이에 따라 일반상대성이론을 적용하여 슈바르츠실트 블랙홀 주변에서 물질이 어떻게 운동하는지 공부하고 주변 물질이 내는 방출선을 시뮬레이션 해보았다.

## 2. 개요

### 블랙홀과 일반상대성이론



(그림 1) 슈바르츠실트 블랙홀의 강착원반에 의한 이미지 (김무수 & 이영민 제작)

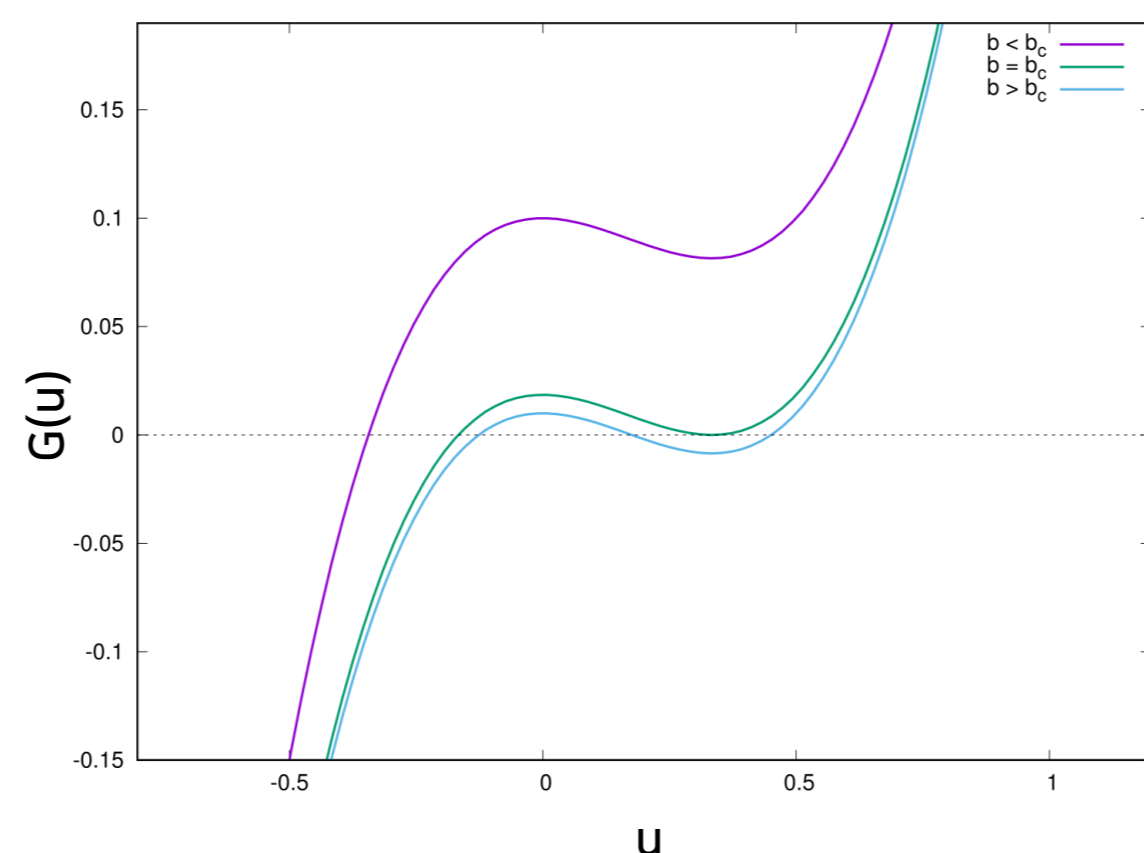
- 블랙홀이 주위에 강착원반을 형성하면 물질은 매우 빠르게 운동하고, 이에 해당하는 운동 에너지를 열에너지로 방출하기 때문에 수백만도 정도로 가열되어 X-ray를 방출한다.
- 아인슈타인(Albert Einstein)은 시공간의 곡률과 물질의 분포에 관한 아인슈타인 방정식 (Einstein Field equations)을 얻었고, 이에 대한 해를 슈바르츠실트(Karl Schwarzschild)가 구하였다. 슈바르츠실트의 해를 이용하여 블랙홀이 시공간을 어떻게 휘게 하는지 볼 수 있다.

$$d\tau^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2M}{r}\right)} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2$$

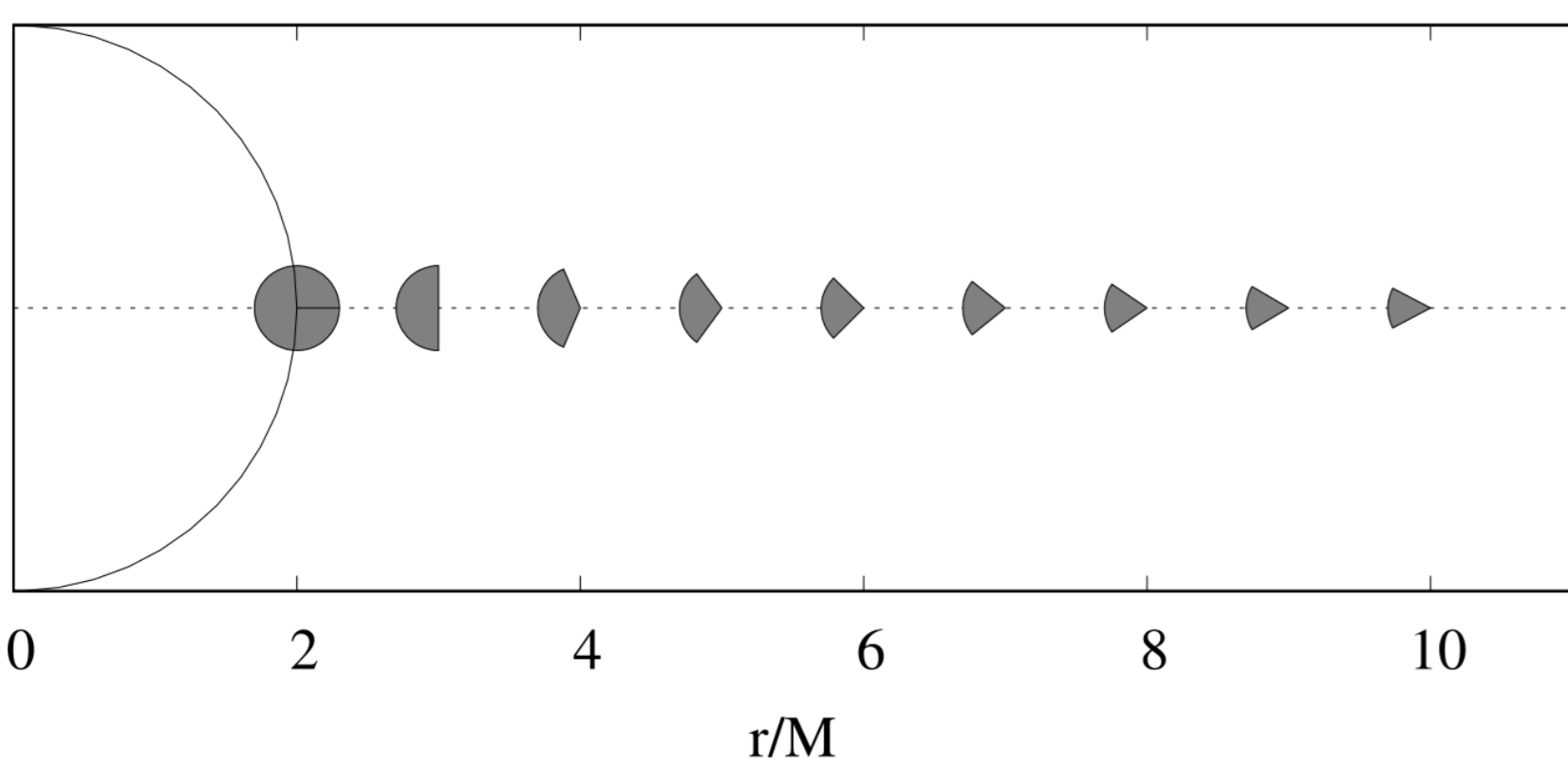
광자는 null geodesic을 따르고  $\theta = \frac{\pi}{2}$ 에 대하여,

$$\left(\frac{du}{d\phi}\right)^2 = 2Mu^3 - u^2 + \frac{1}{b^2} \quad (u = \frac{1}{r})$$

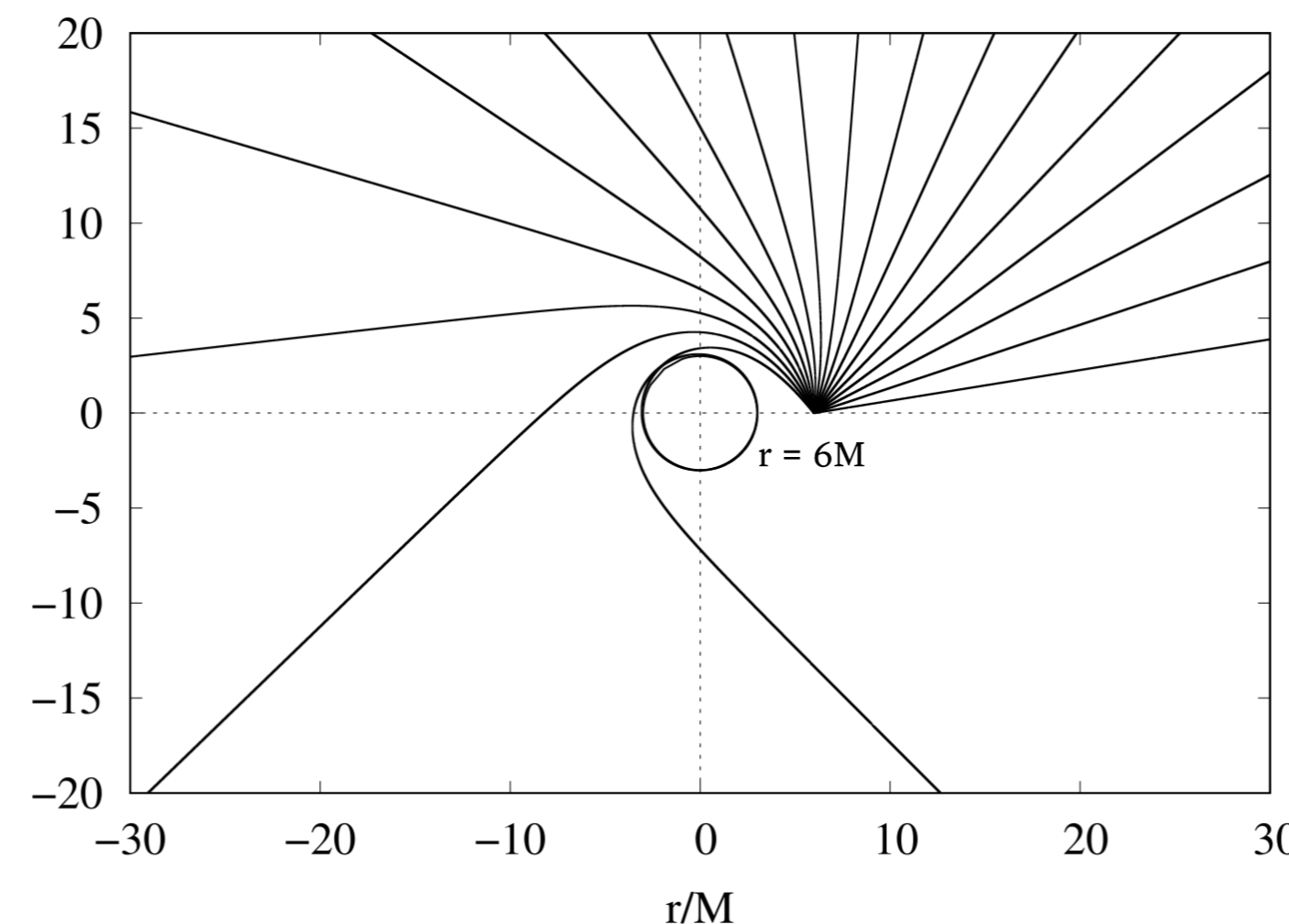
이를 통하여 블랙홀 근처에서 광자의 경로가 얼마나 휘어지는지 알 수 있다.



(그림2) 광자의 유효 퍼텐셜

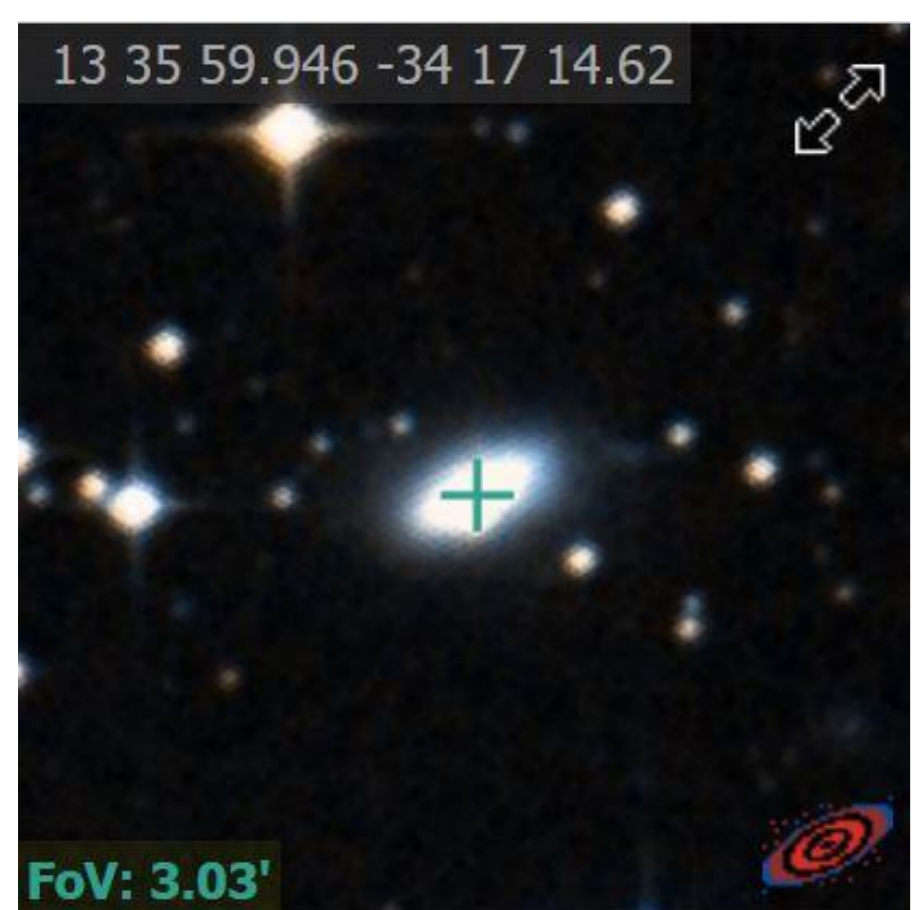


(그림3) The cone of avoidance

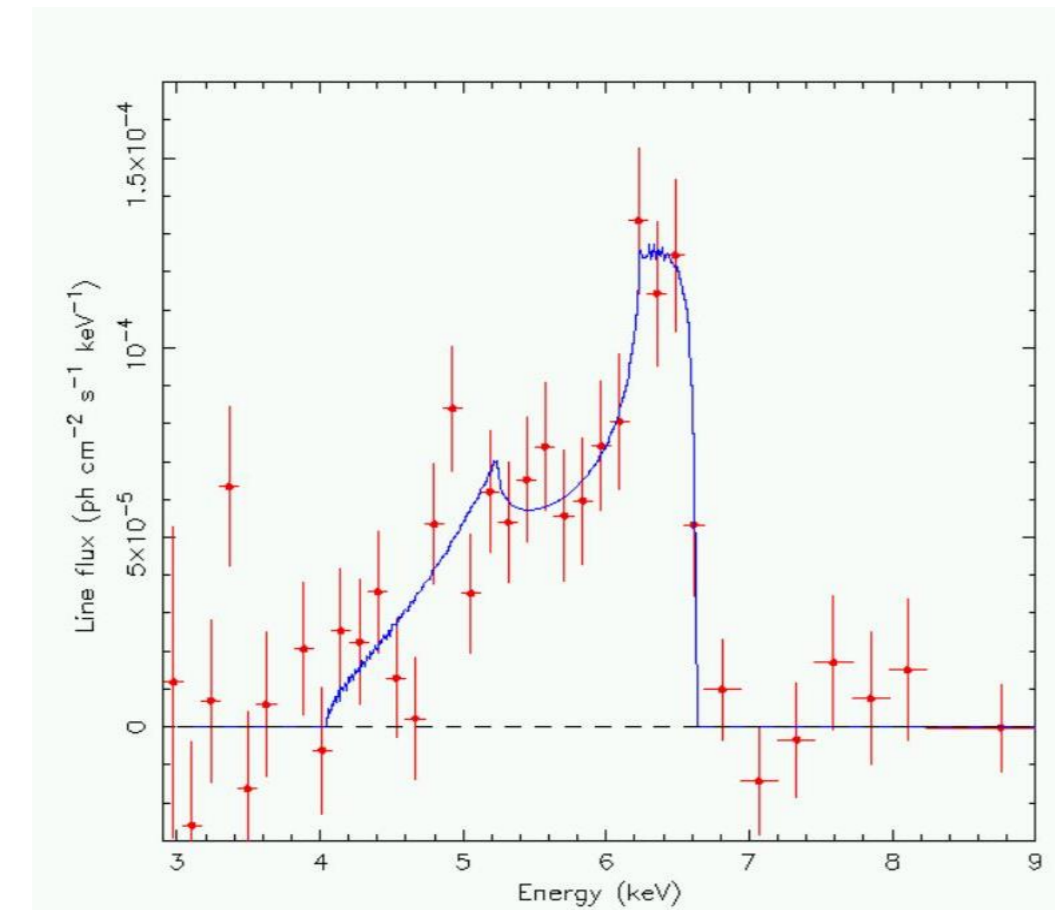


(그림4) r = 6M일 때 입사각에 따른 광자의 경로

### X-ray 스펙트럼



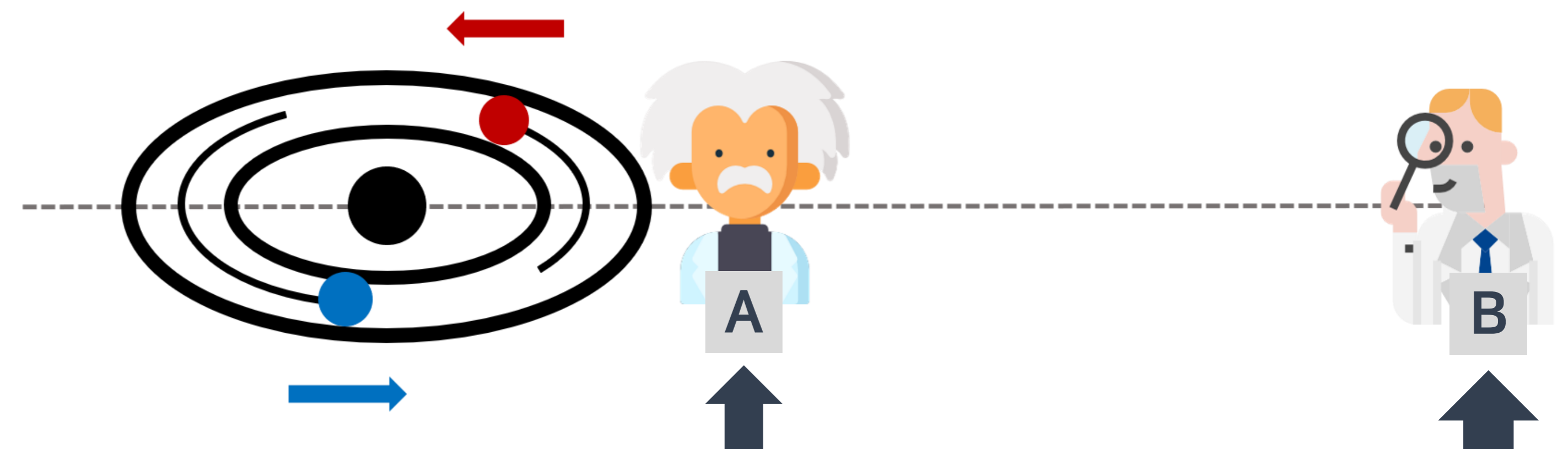
(그림5) MCG-6-30-15 (SIMBAD)



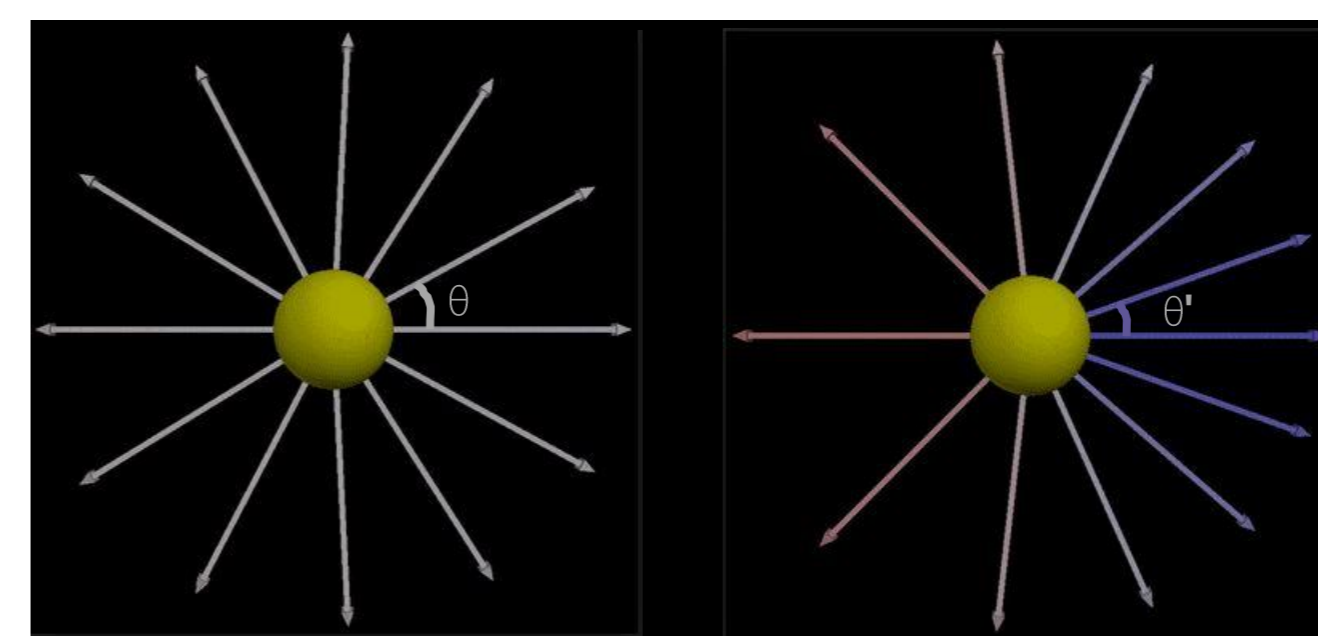
(그림6) MCG-6-30-15 X-ray 스펙트럼 (Tanaka et al, 1995, Nature, 375, 659)

- Seyfert Galaxy**
  - : 은하 중심에 거대질량 블랙홀
  - : Active Galactic Nuclei
- K $\alpha$  line**
  - :  $n = 2 \rightarrow n = 1$
  - : 수 keV  $\rightarrow$  X-ray

## 3. 시뮬레이션



### Relativistic Beaming



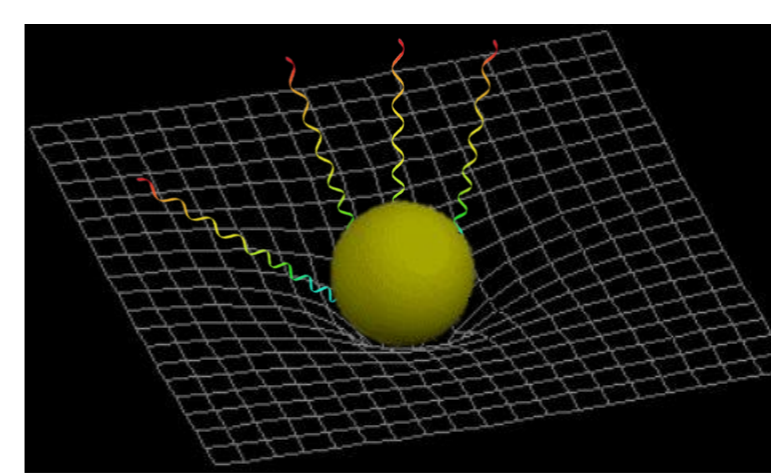
- A가 보는 광원은 움직인다.
- 움직이는 전하에 의한 relativistic beaming

(그림7) Relativistic beaming (Matthew Francis video)

$$\frac{d\Omega'}{d\Omega} = \frac{\sin\theta' d\theta'}{\sin\theta d\theta} = \frac{1}{\gamma^2 (1 + \beta \cos\theta)^2} \quad (c = G = 1)$$

$$(\beta = v, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}})$$

### 중력적색이동

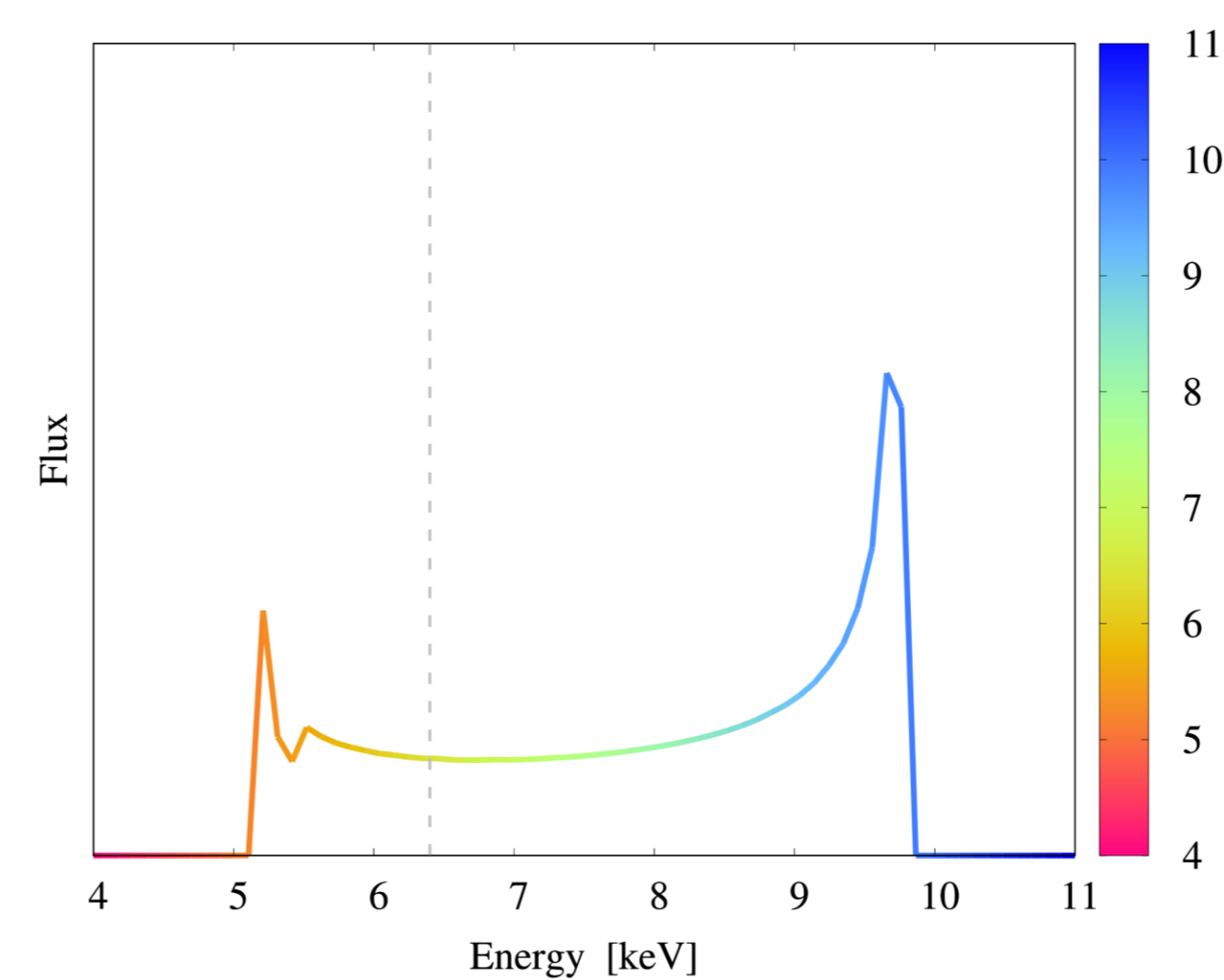


(그림8) 중력적색이동

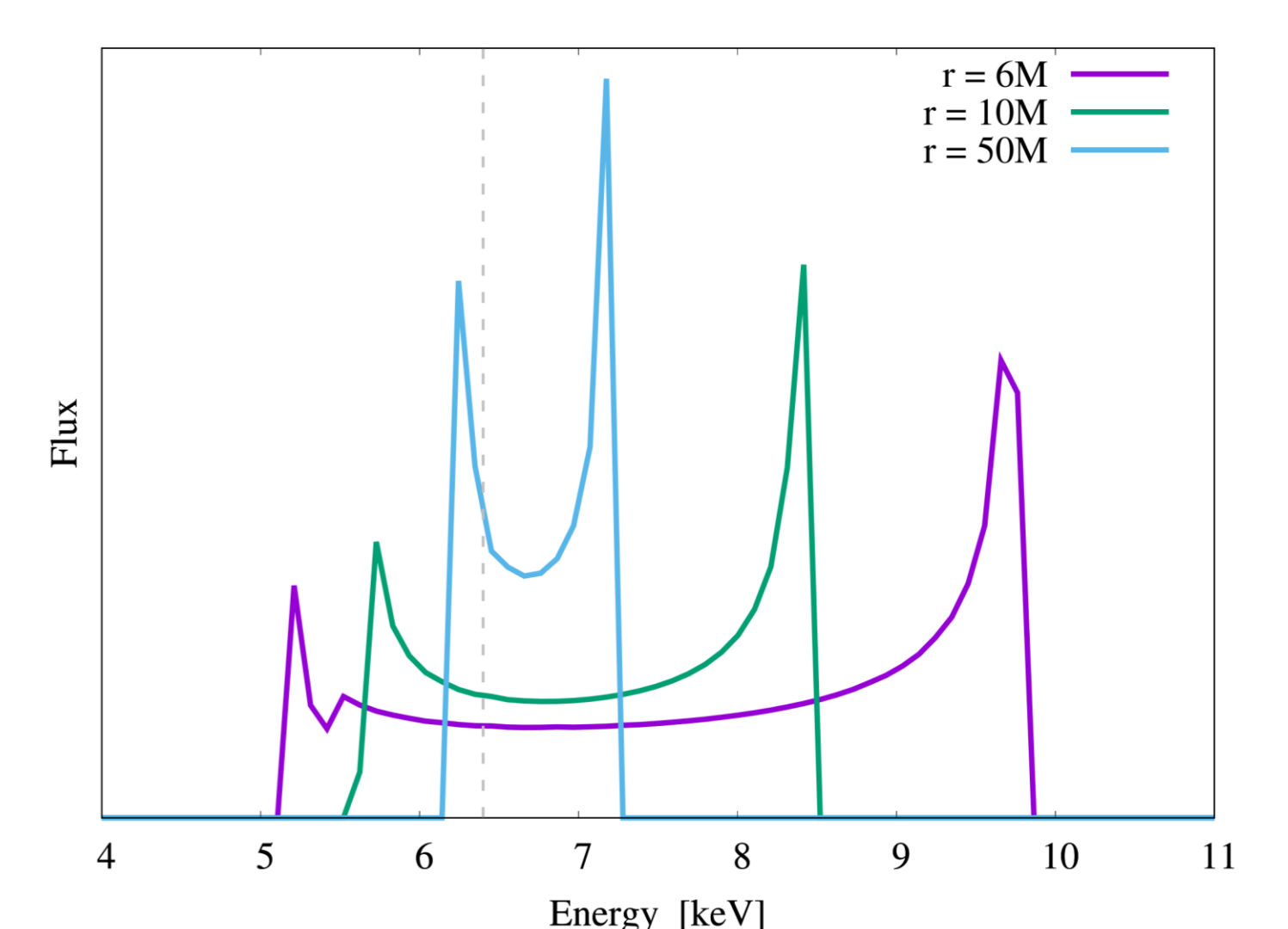
- A와 광원은 같은 중력을 받는다.
- A와 B(최종 관측자)는 다른 중력을 받는다.

$$\frac{\nu_B}{\nu_A} = \frac{\sqrt{1 - \frac{2M}{r_A}}}{\sqrt{1 - \frac{2M}{r_B}}} \approx \sqrt{1 - \frac{2M}{r_A}} \quad (r_B \rightarrow \infty)$$

## 4. 결과



(그림9) r = 6M일 때 Keplerian ring에 의한 방출선



(그림10) 거리에 따른 방출선의 변화

- 주파수(에너지)가 큰 쪽이 강조되는 비대칭성을 보인다.
- 블랙홀로부터의 거리가 멀어질 수록 비대칭성은 완화된다.

결과를 정리하면, 블랙홀과 매우 가까운 고리의 경우 중력으로 인한 적색이동보다 블랙홀 주위를 회전하는 속도에 의한 청색이동이 더 우세하다는 것을 볼 수 있다. 또한 relativistic beaming으로 청색 쪽의 플럭스가 크게 나타나는 비대칭성을 확인할 수 있으며, 예상한 바와 같이 블랙홀에서 멀어질 수록 회전속도가 느려지기 때문에 비대칭성이 감소하여 대칭적인 이중마루를 보인다.

## 5. 토의 및 향후 계획

- X-ray 스펙트럼을 통하여 강착원반이 어느 범위에 어떠한 이온화도로 존재하는지 대략적이거나 알 수 있다. 여전히 X-ray 관측은 어려워서 더 좋은 기기 개발이 필요하다.
- 관측자의 시선방향을 다양하게 하여 방향에 따른 변화를 보고, Keplerian ring을 확장하여 disk에 대하여도 시뮬레이션 할 것이다. 이에 따른 스펙트럼의 변화가 있을 것으로 기대된다.