

제11강

제3법칙

열역학 제0법칙은 온도를 정의해주고,
열역학 제1법칙은 열을 정의해줍니다.
이것으로부터 열역학적 엔트로피를 정의할 수 있고,
열역학 제2법칙은 열역학적 엔트로피의
증가를 설명합니다.

$$S(T) - S(T_0) = \int_{T_0}^T \frac{C_p}{T} dT$$

엔트로피의 변화는 적분으로 계산됩니다.

지금까지는 엔트로피의 변화만을 계산할 수 있었습니다.
엔트로피의 절대값은 어떻게 될까요?

열역학 제3법칙 (네른스트)

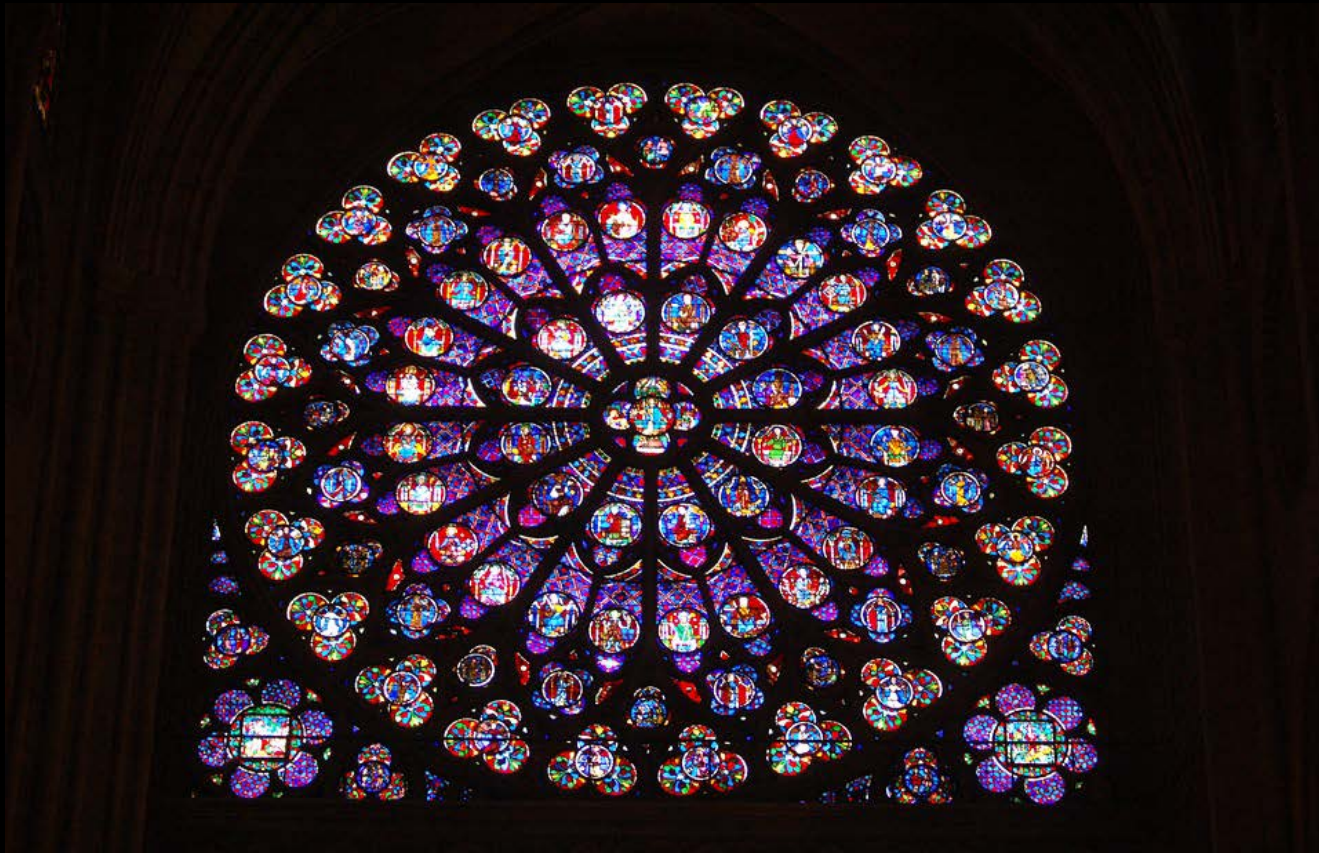
절대0도 근방에서 내부 평형인 계의 모든 반응은
엔트로피 변화 없이 일어난다.

$$T \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta S \rightarrow 0$$

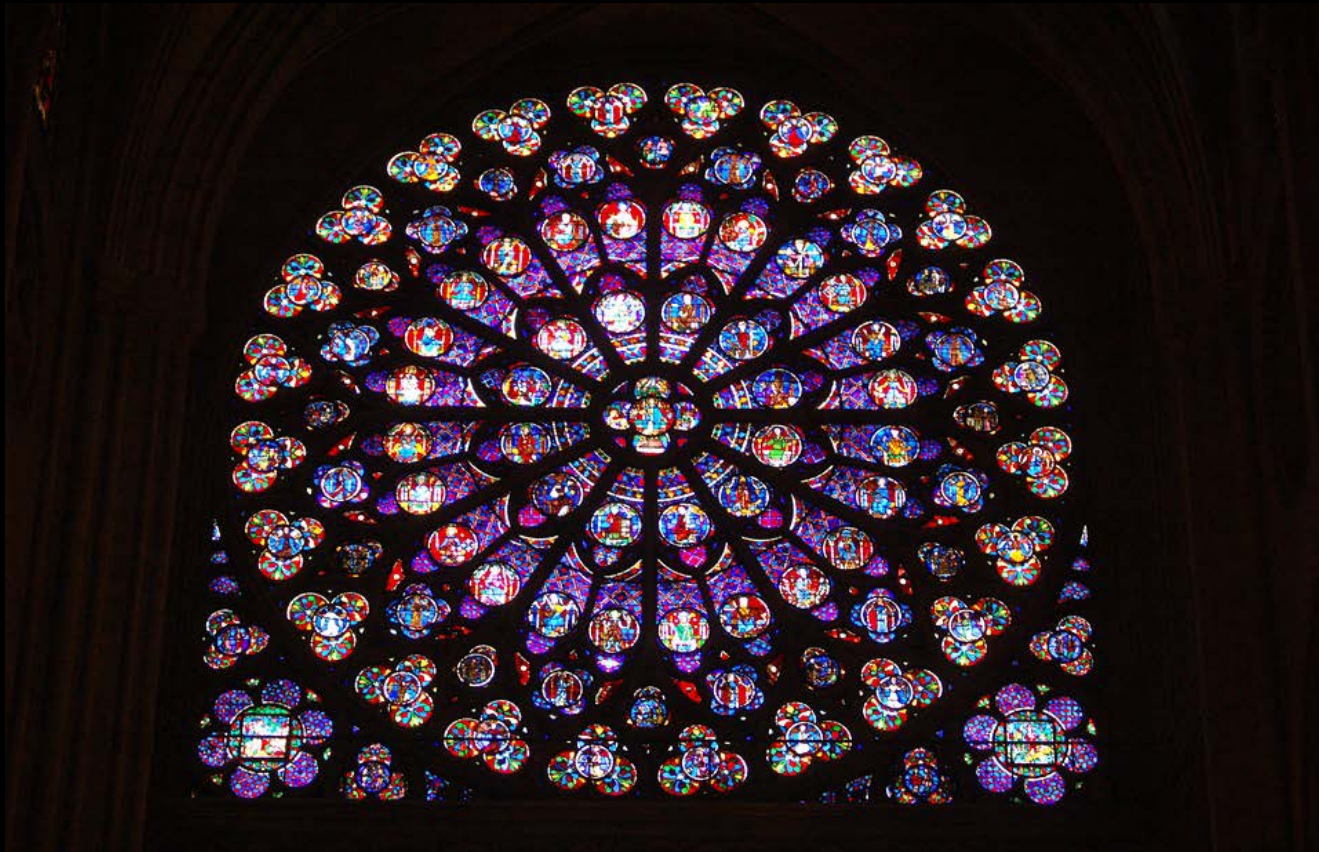
열역학 제3법칙 (플랑크)

내부 평형에 있는 모든 계의 엔트로피는 절대0도에서 같으며
0으로 잡을 수 있다.

$$T \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad S(T) = 0$$



하지만 유리와 같이 **잔류 엔트로피**가 존재하는 경우에는
엔트로피가 0으로 수렴하지 않을 수도 있습니다.



이에 대해 사이몬은 우리가 관심을 갖지 않아도 되는
하부 국면aspect을 무시하면
여전히 엔트로피를 0으로 보낼 수 있다고 설명합니다.

열역학 제3법칙 (사이몬)

내부 평형에 있는 계의 각 국면에 의하여 계의 엔트로피는
 $T \rightarrow 0$ 에 따라 0으로 접근한다.

$$T \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad S(T)|_{aspect} = 0$$

$$C = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right) \rightarrow 0$$

열역학 제3법칙이 옳다면
절대 0도에서 열용량은 0으로 접근합니다.

$$\beta_p = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T \rightarrow 0$$

그리고 등압 팽창률도 0으로 수렴합니다.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T \propto \left(\frac{\partial \chi}{\partial T}\right)_B \rightarrow 0$$

더 나아가서 이상기체 법칙과
퀴리의 법칙도 맞지 않게 됩니다.

이것은 높은 온도에서는 무시해도 괜찮았던 입자간 상호작용이
낮은 온도에서는 중요해지기 때문에 일어나는 현상입니다.

온도가 낮아질수록 어떤 조작에 대한
엔트로피의 변화율이 줄어들게 됩니다.
이것으로부터, 열역학 제3법칙에 대한
다른 형태를 얻을 수 있습니다.

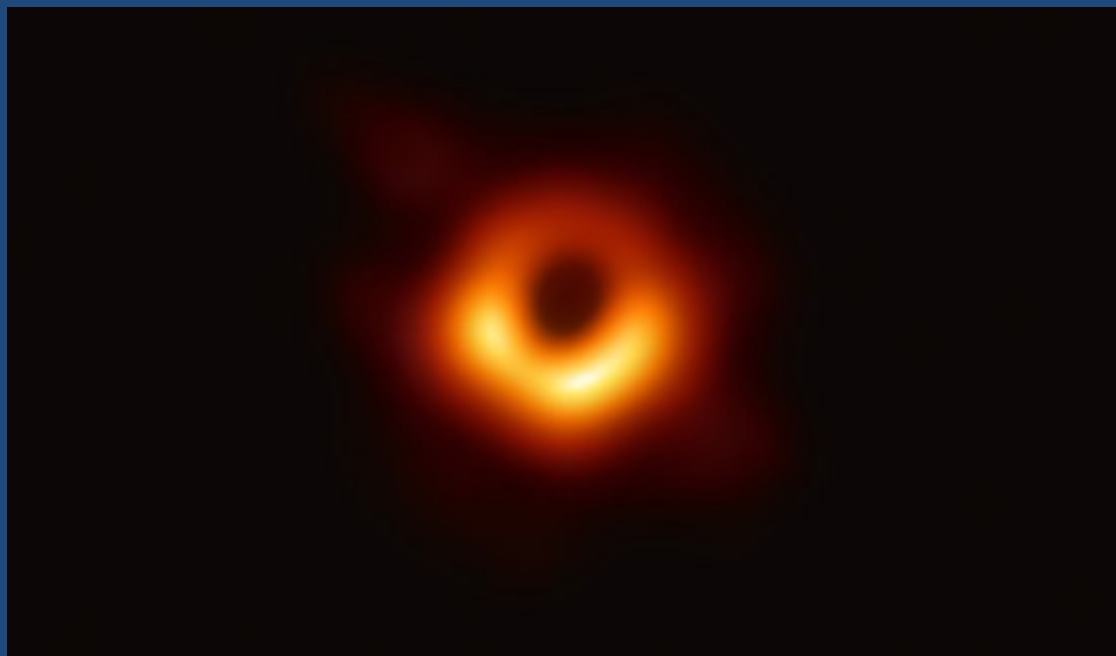
열역학 제3법칙

유한한 단계로 $T = 0$ 까지 냉각하는 것은 불가능하다.

이렇게 우리는 열역학의 네 가지 법칙에 대해
알아보았습니다.

특히 열역학 제3법칙에 대해서는
통계역학을 통해 좀 더 자세한 고찰이 가능해질 것입니다.

열역학의 법칙들, 그리고 특히 제3법칙에 대해
흥미로운 논쟁을 하나 살펴보도록 하겠습니다.



블랙홀에서도 열역학의 법칙들과 비슷한 관계가
존재한다는 것이 알려졌습니다.

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Phi dQ + \Omega dJ$$

1973년 바딘, 카터 및 호킹은 위와 같은 관계식을 증명합니다.

$$dM = \frac{\kappa}{8\pi} dA + \Phi dQ + \Omega dJ$$

여기에서 M 은 블랙홀의 질량(에너지),
 κ 는 지평선에서 중력가속도의 크기를 나타내는 양이고,
 A 는 블랙홀의 사건 지평선의 면적을 나타냅니다.

$$dA \geq 0$$

실은 이에 앞서 1970년 호킹은 몇 가지 수학적 조건 아래에서
위와 같이 블랙홀 면적 증가의 관계식을 증명합니다.

$$A \propto S$$

이를 토대로, 1974년 베켄슈타인은 블랙홀의 **면적**이 실제로 블랙홀의 **엔트로피**에 해당하지 않을까를 추측하게 됩니다. 그러나 아직까지 정확한 비례상수가 무엇인지는 알 수 없었습니다.

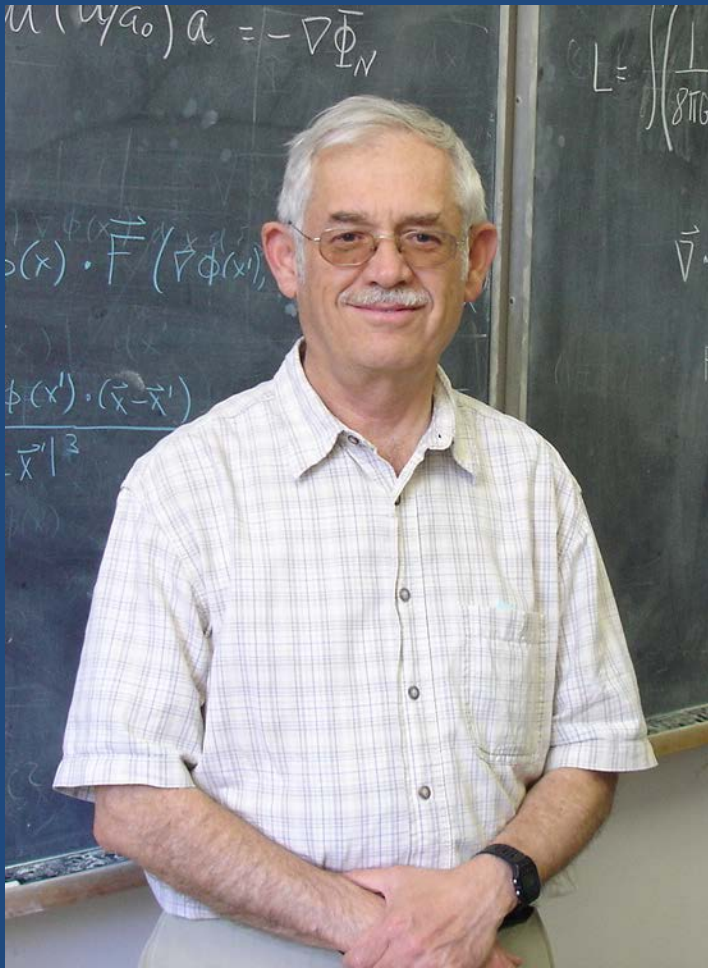
$$\langle n_{\omega} \rangle \propto \frac{1}{e^{2\pi\omega/\kappa} - 1}$$

호킹은 처음에는 이 생각을 싫어했지만
1975년 경, 블랙홀 근처에서의 양자효과에 의해
입자가 방출된다는 것,
즉 입자가 방출되는 온도를 정의할 수 있다는 것을 발견합니다.

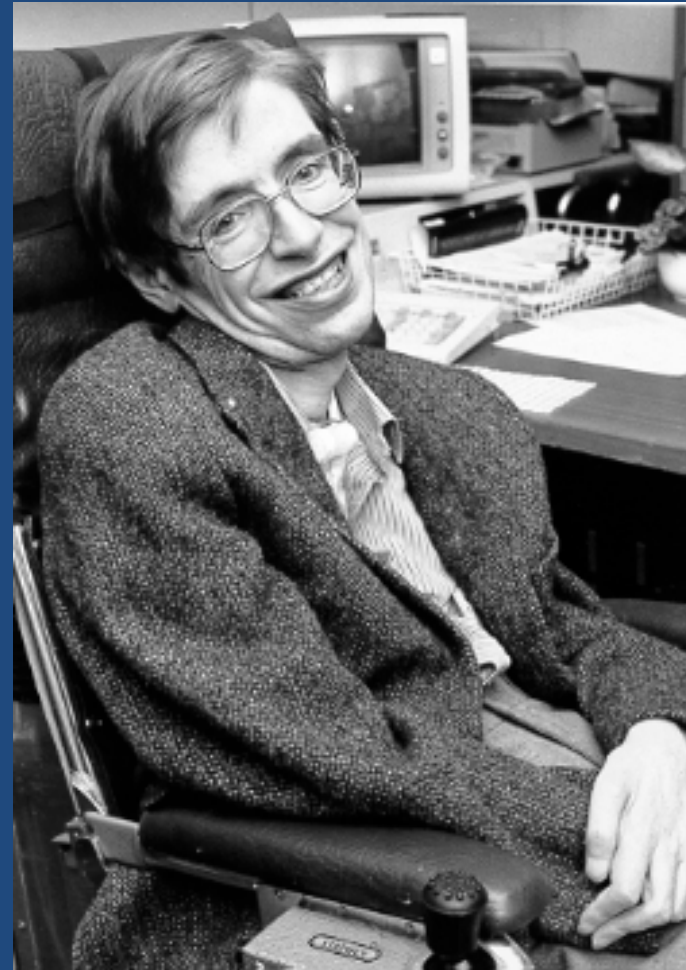
$$T = \frac{\kappa}{2\pi}$$

$$S = \frac{A}{4}$$

이 온도를 호킹 온도Hawking temperature라고 하고,
이 온도에 의해 정의되는 엔트로피를
베켄슈타인-호킹 엔트로피Bekenstein-Hawking entropy라고 합니다.



야코브 다비드 베켄슈타인



스티븐 윌리엄 호킹



더 나아가서 이스라엘Israel은 유한한 단계에 의해서는
절대 0도에 도달할 수 없다는
블랙홀 열역학의 제3법칙을 증명합니다.



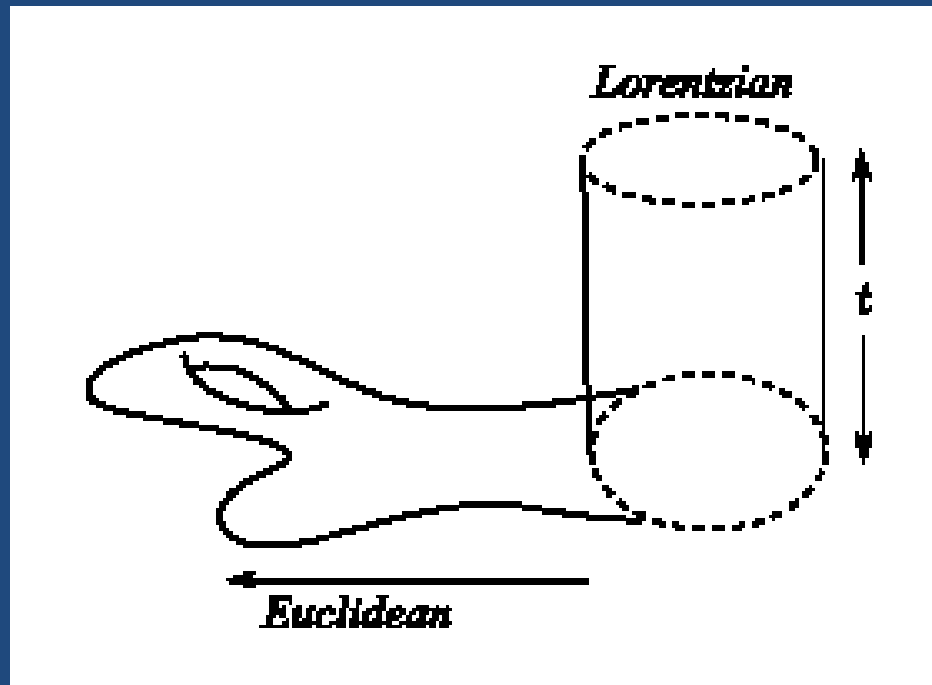
그러면 온도가 0인 블랙홀의 경우,
엔트로피는 어떻게 될까요?
플랑크의 생각에 따라 엔트로피가 0이 될까요?

$$S = \frac{A}{4} \stackrel{?}{=} \ln \Omega$$

사실은 90년대 이후로, 70년대에 정의된 **열역학적 엔트로피**를
볼츠만 엔트로피로 생각할 수 있는지에 대해서
연구가 시작되게 됩니다.

$$S = \frac{A}{4} \stackrel{?}{=} \ln \Omega$$

이것을 위해서는 블랙홀의 **미시상태**를 세는
양자중력이론의 방법이 필요합니다.



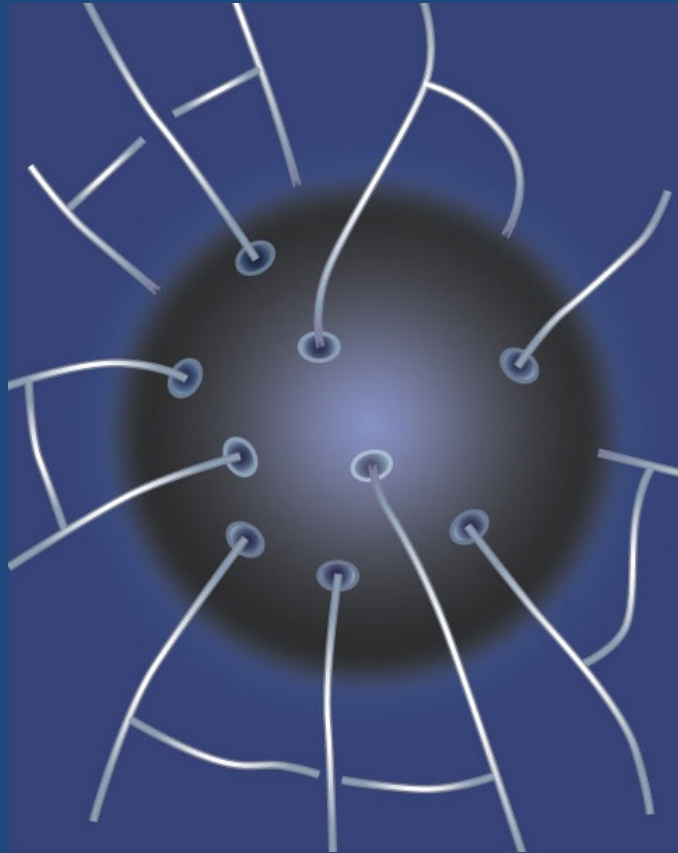
1995년 호킹, 호로비츠 및 로스는
유클리드 경로적분의 방법을 사용해서
온도가 0인 블랙홀은 면적이 0이 아니더라도
엔트로피가 0이 되어야 한다고 주장했습니다.



다른 한 편, 1996년, 스트로민저와 바파는
끈 이론의 이중성을 사용해서
온도가 0인 블랙홀의 엔트로피가 베켄슈타인-호킹 엔트로피와
같다는 것을 보였습니다.

$$S = \frac{A}{4} \stackrel{?}{=} \ln \Omega$$

이 두 결과 사이의 차이에 대해
어떻게 설명해야 하는지 우리는 아직 잘 모르고 있습니다.



흥미롭게도 1996년 같은 시기에,
아슈테카, 로벨리, 스몰린 등은
고리양자중력이론의 방법을 사용해서
일반적인 블랙홀의 엔트로피가 면적에 비례한다는 것을 보입니다.

열역학 제3법칙 (플랑크)

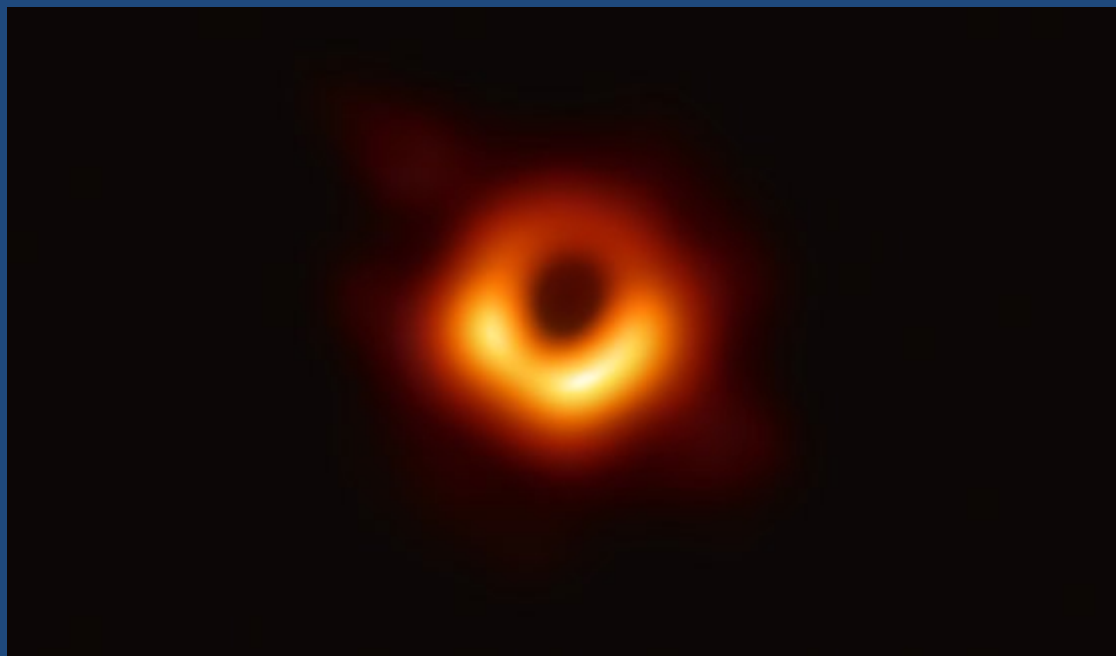
내부 평형에 있는 모든 계의 엔트로피는 절대0도에서 같으며
0으로 잡을 수 있다.

$$T \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad S(T) = 0$$

열역학 제3법칙 (사이몬)

내부 평형에 있는 계의 각 국면에 의하여 계의 엔트로피는
 $T \rightarrow 0$ 에 따라 0으로 접근한다.

$$T \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad S(T)|_{aspect} = 0$$



어쩌면 우리는 아직 블랙홀의 엔트로피에 대해
더 알아야 할 것들이 많은지도 모르겠습니다.

감사합니다