

해결 또는 미해결?: 블랙홀 정보손실문제와 관련된 최신 논의들

염동한 부산대 조교수

요 약

블랙홀의 정보손실문제에 대한 답은 물리학이 근본적으로 예측가능성을 가지는가, 그리고 속성은 존재를 충분히 결정하는가에 대한 철학적 질문에 대한 답과 연결된다. 블랙홀에서 정보가 손실된다면, 궁극의 이론 또는 양자중력이론은 예측 가능성을 잃어버리게 되며, 따라서 자연은 근본적으로 과거의 자료로부터 결정할 수 없는 것이 되고, 속성은 존재를 지칭하기에 충분하지 않게 된다. 다수의 물리학자들은 정보손실문제를 해결해야 할 문제로 생각하며, 이 문제를 해결하기 위해 다양한 가설들이 제안되어 왔다. 본 논문에서는 먼저 이 문제에 대한 다양한 해법의 후보들을 요약해보고, 가장 최근에 끈 이론 분야에서 주목을 받고 있는 이론, 즉 레플리카 워홀을 통한 얽힘 엔트로피의 섬(island)에 대한 이론을 정리해보고자 한다.

I. 서론: 블랙홀 정보손실문제와 그 철학적 중요성

존재는 속성으로 충분히 결정되는가? 아니면 속성만으로는 환원될 수 없는 다른 무엇인가가 있는가? 또는 이 질문은 이렇게 바꾸어 물을 수도 있을 것이다. 속성의 차원에서 두 대상을 구분할 수 없다면(indistinguishable) 그 두 대상은 같은 존재(identical)인가? 아니면 속성의 차원에서는 두 대상을 구분할 수 없다 하더라도, 두 존재가 다르다고 말할 수 있는 다른 무엇인가가 있어서, 이를테면 내가 한 대상을 지칭함으로써 두 존재를 다르다고 말할 수 있는가?

이렇게 오래된 철학문제가 현대 물리학의 최전선에 나타나고 있다. 고전 역학(classical mechanics)의 세계관에서는 세계의 모든 정보가 질점의 위치, 즉 운동(motion)에 담겨있고, 이 운동은 뉴턴의 운동 방정식(equation of motion)에 의해 결정되기 때문에, 초기조건이 정해지면 세계의 모든 정보는 결코 손실되지 않는다. 비록 현실적인 계산은 어려울 수 있더라도

말이다. 이에 비해 양자 역학(quantum mechanics)의 세계관에서는 세계의 모든 정보가 양자 상태(quantum state) 또는 파동 함수(wave function)에 담겨있다. 이 양자 상태 또는 파동 함수는 슈뢰딩거 방정식(Schrodinger equation)에 의해 결정된다. 비록 파동 함수를 해석할 때, 측정을 거친 뒤 확률 분포로 해석을 해야 하긴 하지만(Born interpretation), 파동 함수 자체는 적당한 경계조건만 정해지면 슈뢰딩거 방정식에 의해서 완전히 결정되게 된다. 따라서 양자 역학적 세계관에서도 정보는 손실되지 않으며, 우리는 (통계적인 범위에서) 근본적인 예측가능성을 가지고 있다고 생각할 수 있다. 우리는 주어진 실험에 대해서 어떤 종류의 통계적 분포를 예상할 수 있고, 반복된 실험에 의해 이 통계 분포를 검증 또는 반증할 수 있게 되는 것이다.

이처럼 정보의 보존 또는 양자역학의 유니타리성(unitarity)은 양자 역학이 이론적으로 의미를 가지기 위한 근본적인 전제라고 생각할 수 있다. 그런데 흥미롭게도 스티븐 호킹(Stephen W. Hawking)은 이러한 양자 역학의 유니타리성이 블랙홀에서는 붕괴될 수 있을 것이라고 생각하였다(Hawking, 1976). 블랙홀은 중력붕괴에 의해서 만들어지는 천체인데, 이미 1970년대 중반까지 연구된 바에 의하면, 일단 블랙홀이 형성된 뒤에는 블랙홀의 질량, 각운동량, 전하량을 제외하고는 중력 붕괴를 야기한 천체의 모든 정보가 지평선 너머로 넘어간다고 한다(no-hair theorem). 물론 이런 경우에 크게 문제가 되지 않았던 것은, 정보가 블랙홀 내부에 남아있다고 생각하면 되기 때문이었다. 그런데 호킹의 1975년 기념비적 업적에 따르면, 블랙홀은 양자 효과에 의해 입자(Hawking radiation)를 방출하며, 따라서 블랙홀 자체가 유한한 시간 안에 증발해서 사라져야 한다는 것을 발견하게 된 것이다. 이렇게 블랙홀이 증발을 한다면, 블랙홀의 증발은 사건 지평선의 정보에만 의존하므로, 결국은 블랙홀의 질량, 각운동량, 전하량을 제외한 모든 양자 역학적 정보들은 복원할 수 없게 된다는 것이다.

만일 이 주장이 사실이라면, 블랙홀은 정보를 잃어버리게 된다. 이것을 블랙홀의 정보손실문제(information loss problem)라고 한다. 블랙홀의 정보손실문제는 양자 역학과 중력 현상이 만나기 때문에 생기는 문제, 즉 양자중력이론이 만들어내는 미해결문제의 하나로 우리에게 남아있으며, 우리가 어떤 시점에 정합적인 양자중력이론, 즉 이른바 궁극의 이론(Theory of Everything)을 완성하게 된다면, 이 이론이 정보손실문제를 해결해주리라 기대할 수 있을 것이다.

그러나 좀 더 부정적으로 보자면, 즉 블랙홀에서 정보가 근본적으로 손실된다면, 중력을 포함한 양자 역학은 사실상 존재할 수 없으며, 이 자연은 근본적으로 예측 가능성을 잃어버리게 된다는 것을 의미할 것이다. 두 개의 서로 식별가능한 대상이 중력붕괴를 거쳐 증발을 하고

나면 식별불가능한 대상이 될 수 있으며, 따라서 두 대상은 오로지 지칭에 의해서만 구분을 할 수 있는 상황이 될 수도 있다. 자연은 근본적으로 과거의 자료로부터 결정할 수 없는 것이 되고, 속성은 존재를 지칭하기에 충분하지 않게 된다. 그래서 정보손실문제를 최초로 주장한 호킹의 1976년 논문 제목은 “중력 붕괴에서 예측 가능성의 실패(Breakdown of predictability in gravitational collapse)”라는 제목인데, (그의 동료였던 돈 페이지에 의하면) 사실 저널의 심사를 거치기 전의 원 제목은 “중력 붕괴에서 물리학의 실패(Breakdown of physics in gravitational collapse)”였다고 한다.

II. 정보손실문제에 대한 다양한 해법들

다수의 물리학자들은 정보손실문제를 해결해야 할 문제로 생각하며, 이 문제를 해결하기 위해 다양한 가설들이 제안되어 왔다. 정보손실문제에 대한 수많은 해법들을 논리적으로 나열하기 위해, 먼저 정보가 ‘어디에’ 남아있는지를 기준으로 해서 분류해보자. 그러면 다음과 같은 네 가지 가능성이 가능할 것이다 (Chen et. al., 2015).

가능성 1: 정보가 손실된다. 즉, 정보는 어디에도 남지 않는다.

가능성 2: 호킹 복사가 정보를 담고 있다.

가능성 3: 호킹 복사 이외의 다른 곳에 정보가 남는다.

가능성 4: 정보는 보존되지만 우리가 인식할 수 있는 방법으로는 전달되지 않는다.

이 네 가지 가능성에 대해서 간략하게 살펴보도록 하자.

1. 가능성 1: 정보가 손실된다

첫 번째 가능성은 정보가 손실된다는 것이다. 이것은 1976년 호킹이 처음 생각한 가능성이 다. 뱅스, 페스킨 및 서스킨드의 논문에 의하면, 우리가 정보가 손실된다는 것을 받아들여지게 되면, 더 나아가서 에너지의 보존도 위반되어야 한다는 것을 주장하였다. 그러나 다른 한 편, 월드와 언루는 뱅스, 페스킨 및 서스킨드의 논문이 너무 과장된 추측일 수 있다고 주장하였다. 다른 한 편, 오늘날의 주류 끈 이론 학자들은 정보가 보존된다는 사실 자체는 믿을 수 있는

것으로 생각하는데, 이것은 홀로그래피 원리와 반-드지터/등각장론 대응(AdS/CFT correspondence)에 따라 중력 현상에 대응되는 유니테리한 양자장론이 존재한다고 믿어지기 때문이다.

2. 가능성 2: 호킹 복사가 정보를 담고 있다

1990년대 중반까지 끈 이론의 주류 물리학자들은 이 가능성을 선호하였다. 트호프트와 서스킨드 등은 블랙홀 상보성(black hole complementarity)을 주장하였는데, 이에 따르면 정보는 중력 붕괴에 의해 블랙홀의 내부로 들어가게 되지만, 동시에 블랙홀의 외부의 관점에서는 양자 역학의 유니테리성을 따라 정보가 보존된다고 한다. 이 두 관점은 모순되는 것처럼 보이지만 (또는 정보가 블랙홀의 안쪽과 바깥쪽에 복사가 된 것처럼 보이지만) 실은 입자와 파동의 상보성과 같이 공존한다는 것이다. 그러나 블랙홀 상보성에 대한 이론적 부정합성이 제기되어 근래에는 단순히 이런 방식만으로는 블랙홀의 정보손실문제를 설명할 수 없게 되었다.

3. 가능성 3: 정보가 호킹 복사 이외의 다른 곳에 남는다

정보가 호킹 복사 이외의 다른 형태로 남는다면, 자연스러운 경우 준고전적 영역을 벗어나는 시점, 즉 양자중력이론이 작용해야 하는 블랙홀 증발의 마지막 단계까지 정보가 블랙홀 내부에 압축된다는 것을 의미할 것이다. 그런데 이렇게 작은 영역에 정보가 압축되기 위해서는 충분한 엔트로피가 필요하며, 준고전적 엔트로피보다 실제 엔트로피가 무한대에 가깝게 커질 수 있는데, 이렇게 되면 이론적으로 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이 이외에도 다양한 기작에 의해 호킹 복사 이외의 방식으로 정보를 남길 수 있는 방법이 알려져 있지만, 대부분의 경우는 아주 특수한 조건에서만 성립할 수 있어서 일반성을 가지는 답이 되기 어렵다.

4. 가능성 4: 정보는 보존되지만 우리가 인식할 수 있는 방법으로는 전달되지 않는다

정보가 보존되지만 호킹 복사든 아니든 다른 형태든 우리가 인식할 수 있는 방법으로는 전달되지 않는다면, 겉보기의 모순점들은 모두 피할 수 있을 것이다. 그러나 정보를 '우리가' 인식할 수 없다면, 그것을 인식하고 정보의 보존을 확인하는 대상은 과연 누가 될 것인가?

이 부분에 대한 해명이 필요하다.

III. 어떤 자연 법칙이 수정되어야 하는가?

다른 한 편, 같은 문제에 대해 어떤 자연 법칙을 수정할 것인가의 관점으로 정리할 수도 있다. 이와 관련해서 우리는 지금까지 이론적으로 정합적이며 실험적으로 충분히 검증된 다음과 같은 원리들에 의존하고 있었다.

원리 1: 양자 역학의 유니터리성. 즉, 정보가 보존된다.

원리 2: 양자장이론의 국소성(locality). 즉, 호킹의 계산이 옳다.

원리 3: 일반상대성이론. 즉, 특이점에 도달하기 전까지는 블랙홀이 일반상대성이론을 따른다.

원리 4: 블랙홀의 면적에 비례하는 베켄슈타인-호킹 엔트로피가 볼츠만 엔트로피와 같다.

원리 5: 블랙홀에서 방출되는 정보를 인식하는 관찰자가 존재할 수 있다.

이 다섯 가지 원리들은 블랙홀의 정보손실문제를 만들어내게 되며, 따라서 모두 옳을 수 없고, 이 중에서 최소한 하나는 수정되어야 한다. 그렇다면, 우리는 이 중에서 어떤 자연 법칙을 틀렸다고 말해야 할까? (Ong and Yeom, 2016)

1. 양자역학의 유니터리성: 정보의 보존 vs. 정보의 손실

양자역학이 유니터리성을 잃어버린다면, 즉 정보가 보존되지 않는다고 가정하면 이론적 부정합성을 피할 수 있다. 그러나 그렇게 되면 우리는 양자 역학으로서의 자연의 근본 법칙은 존재하지 않는다는 것을 동시에 받아들여야 한다. 또한 이 선택은 반-드지터/등각장론 대응과 같은 끈 이론의 중요 업적들과 충돌한다는 문제가 있다.

2. 양자장이론의 특성: 국소성 vs. 비국소성

양자장이론이 비국소적이라면 이 문제를 해결할 수 있지만, 일단 이 가능성을 도입하고 나면 인과율을 비롯한 자연의 근본적인 원리를 훼손하는 것이 될 수 있다. 그러면 이론적으로 비국소적인 효과를 준고전적인 영역에 어떻게 정합적으로 도입할 수 있을까? 서스킨드와 말다세니는 서로 얽혀있는(entangled) 입자들의 사이에는 대응되는 아인슈타인-로젠 다리(일종의 웜홀)가 존재한다고 생각했다 (ER=EPR 추측). 블랙홀의 경우에 이 가설을 적용하면, 블랙홀의 내부와 외부가 서로 적극적으로 상호작용할 수 있게 된다는 것이다. 끈 이론에서 이러한 가정이 동작하는 몇 가지 예를 제시할 수 있지만, 비섭동적인 효과가 있는 경우에는 아인슈타인-로젠 다리와 양자 얽힘 사이에 정확한 대응 관계를 말하기 어려울 수 있으며, 따라서 이러한 원리가 일반적인 블랙홀에 적용될 수 있는지에 대해서는 의문의 여지가 있다.

3. 일반상대성이론: 특이점을 제외하고는 항상 성립 vs. 특이점이 아니더라도 성립 안할 수 있음

일반상대성이론적 관점에서는 설명하기에 문제가 없어 보이는 곳(예들 들면, 지평선)에서 조차 양자 효과에 의해 일반상대성이론이 위반되어야 한다면, 역시 원리들 간의 부정합성을 피할 수 있다. 예를 들어, 알름헤이리, 마를프, 폴친스키 및 설리는 블랙홀의 지평선 부근에 일반상대성이론이 위반되는 방화벽(firewall)이 존재해야 한다고 생각했다. 이렇게 함으로서 일반상대성이론이 위반되는 영역을 블랙홀의 내부로 제한지어서 그 효과가 외부로 드러나지 않도록 (즉, 천체물리학적 실험 결과들과 충돌하지 않도록) 하고자 했다. 그러나 만일 일반상대성이론이 지평선 부근에서 위반된다면, 확률은 낮더라도 그 효과가 블랙홀 외부로 드러나는 것이 원리적으로 가능하다. 이러한 경우에는 우리가 방화벽의 효과를 이론적으로 통제할 수 있는 방법이 존재하지 않으며, 따라서 방화벽이 어떻게 구성되는지에 대한 근본적인 설명이 없는 이상, 이 가정이 의미 있는 가정이라고 말할 수는 없다.

4. 엔트로피: 블랙홀의 면적에 비례 vs. 블랙홀의 면적과 상관없음

블랙홀의 면적이 블랙홀의 열역학적 엔트로피에 해당한다는 것이 베켄슈타인과 호킹의 연구로부터 잘 알려져 있었다. 따라서 자연스러운 추측은 블랙홀의 면적이 블랙홀의 실제 통계역학적 엔트로피, 즉 볼츠만 엔트로피와 같다는 것이다. 여기에 대해서 엄밀한 증명은 없지만, 어떤 제한된 경우에는 끈 이론으로부터 이 대응 관계를 확인해볼 수 있으며, 약간의

모호함은 있으나 고리양자중력이론에서도 이 관계를 확인해볼 수 있다. 그러나 이 관계에 대한 근본적인 증명이 없기 때문에, 만일 블랙홀의 면적보다 더 큰 엔트로피가 블랙홀의 내부에 존재할 수 있다면, 정보를 방출하지 않더라도 문제가 없을 수 있다. 문제는 앞의 '가능성 3'에서 이야기한 것처럼, 블랙홀의 내부에 과도한 엔트로피가 누적될 때, 양자역학적으로 심각한 문제를 야기할 수 있다는 것이다.

5. 정보를 인식하는 관찰자: 존재 vs. 부재

마지막으로, 만일 정보를 인식하는 관찰자가 존재하지 않는다면 지금까지 야기된 원리들 사이의 부정합성은 발생하지 않을 것이다. 그러나 정보를 인식하는 관찰자가 기술적으로 어렵다는 차원을 넘어서 근본적으로 존재할 수 없는 이유를 설명하는 것이 필요하다.

IV. 레플리카 워홀과 얽힘 엔트로피의 섬

근래에 끈 이론에서는 이 문제를 양자장이론의 국소성을 극복함으로써 정보가 호킹 복사에 담길 수 있다고 설명하고자 했다. 최근 말다세니와 그의 동료들은 블랙홀의 내부와 외부 사이의 얽힘 엔트로피(entanglement entropy)를 계산하는 방법을 연구하였다 (Almheiri et. al., 2020). 이와 관련해서, 그 동안 설명하기 쉬웠던 부분은 블랙홀이 증발하는 초반에 블랙홀의 내부와 외부 사이의 얽힘 엔트로피가 '증가'하는 부분이었다. 그러나 아주 어려웠던 부분, 즉 블랙홀의 정보손실문제를 해결하기 위해 본질적으로 어려웠던 부분은, 얽힘 엔트로피가 어떤 시점 (페이지 시간) 이후에 '감소'하는 부분을 설명하는 것이었다. 말다세니는 이 계산이 가능하고 실제로 얽힘 엔트로피가 감소한다는 것을 보였던 것이다.

만일 이 계산이 옳다면, 정보손실문제를 아주 훌륭하게 해결한 것으로 해석할 수 있을 것이다. 그런데 여기에서 어떻게 이러한 일이 가능한 것인지에 대해서 생각해볼 필요가 있다. 말다세니에 의하면, 특정 시간 (페이지 시간) 이후에는 블랙홀 내부의 자유도 중에서 일부가 실제로는 블랙홀 외부의 자유도에 기여해야 한다는 것을 보였다. 이렇게 공간적으로는 블랙홀의 내부에 있지만, 엔트로피상으로는 블랙홀의 외부에 기여해야 하는 부분을 엔트로피의 섬(island)이라고 이름 붙였다. 그래서 기존의 기술에서는 엔트로피의 섬을 블랙홀의 내부로 간주했기 때문에 얽힘 엔트로피가 감소하는 것을 설명할 수 없었지만, 그 섬을 블랙홀의 외부로 간주하면 얽힘

엔트로피의 감소를 설명할 수 있다는 것이다.

여기에서 중요한 점은, ‘섬’이란 공간적으로 블랙홀의 내부에 위치해 있지만, 양자 역학적으로는 블랙홀의 외부에 기여한다는 것이다. 어떻게 이런 일이 가능한 것인가? 말다세나는 몇 가지 제한된 예에서 이러한 일이 가능하다는 것을 보였다. 얽힘 엔트로피를 계산하는 과정에서 무시할 수 없는 고차 항들이 기여하게 되는데, 이 항들의 의미가 블랙홀의 내부와 외부로 유클리드 워홀에 의해 이어준다는 것(레플리카 워홀), 그리고 이 과정이 $ER=EPR$ 추측의 철학을 반영한다는 것이다. 이렇게 되면 결국 비국소적 효과에 의해 블랙홀의 내부에서 외부로 정보가 전달될 수 있고, 최종적으로 호킹 복사가 성공적으로 정보를 담게 된다고 이해할 수 있다.

그러나 과연 이 설명이 일반적인 블랙홀에 적용될 수 있는지에 대해서는 좀 더 연구가 필요한 것으로 보인다. 지금까지 이 과정이 구현되었던 것은 1+1 차원에서의 제한된 모형에서였다. 만일 이 아이디어가 일반적인 준고전적 블랙홀이 아니라 끈 이론에서 허용되는 이론에만 적용될 수 있는 아이디어라면, 과연 그 아이디어가 어떤 양자중력이론의 문제에 대한 올바른 해법인지에 대해 다시 한 번 고민해볼 필요가 있을 것이다. 그리고 이 설명 방식이 $ER=EPR$ 추측과 연결된다면, 또한 이 추측이 적용될 수 없는 영역에서는 어떻게 설명할 수 있을지에 대해서 생각해볼 필요가 있을 것이다.

V. 결론: 다시 한 번 철학적 의미로

본 논문에서는 블랙홀의 정보손실문제에 대한 지금까지의 논의를 대략적으로 살펴보았다. 각각의 주장들과 그에 대한 비판점들에 대해서 간략하게 요약해 보았다.

필자가 지지하는 대안은 정보를 인식하는 관찰자가 존재하지 않는다는 것, 즉 가능성 4를 따르는 것, 또는 원리 5를 부정하는 것이다 (Bouhmadi-Lopez et. al., 2019). 그렇다면 정보를 인식하는 관찰자가 존재하지는 않지만 정보가 보존된다는 것은 어떤 의미인가? 필자의 생각으로는 우주 전체를 기술하는 파동 함수는 정보를 보존하지만, 우리(준고전적 관찰자)는 파동 함수 전체를 볼 수 없기 때문에, 우리가 블랙홀에서 방출되는 정보를 인식할 수 없다는 것이다. 우리는 파동 함수 전체를 보는 전지한 관찰자가 될 수 없고, 따라서 우리는 정보의 손실을 사실상 경험하게 될 것이다. 그러나 그것이 자연 법칙이 근본적으로 존재하지 않는다는 것을 의미하는 것은 아니다. 자연 법칙은 존재하지만, 다만 우리는 그것을 확증할 수 없을 뿐이다.

필자의 주장을 이론적으로 일반화하고 확인하기 위한 몇 가지 이론적 작업들이 개진되고 있으나, 지금으로서는 주류 학자들의 접근과는 다르다는 점도 지적해야 할 것이다. 주류 학자들의 접근, 특히 근래에 관심을 많이 받아온 엔트로피 섬에 대한 연구가 필자의 생각과 관련이 될 수 있는지, 또는 어느 한 쪽이 틀린 것으로 판명이 날지에 대해서는 앞으로 연구가 더 필요할 것이다. 그러나 끈 이론 연구자들이 발견한 한 가지 중요한 초점은, 정보의 보존을 이해하기 위해서는 파동 함수의 비섭동적 효과가 중요하다는 것이다. 문제는 이러한 비섭동적 인 효과가 반드시 섭동적인 호킹 복사에 반영이 되어야 하는지, 아니면 비섭동적 효과가 준고전적 관찰자에게 어떤 의미를 가질지에 대해서는 사실 좀 더 깊은 고찰이 필요하다. 향후 연구를 통해 이 문제에 대해 좀 더 깊이 이해할 수 있게 되기를 바란다. 최근에 마롤프와 그의 동료들의 연구에 의하면, 레플리카 워홀을 사용해서 설명하는 방식은 정보의 보존을 설명할 수는 있으나, 이러한 정보의 보존은 파동 함수 전체에 대한 것이 아니라 파동 함수 일부에 대한 것, 즉, 초선택(superselection)에 의한 결과일 수 있다고 이야기하였다 (Marolf et. al., 2020). 그렇다면 과연 이러한 접근 방법이 오히려 파동 함수 전체의 유니타리성과 충돌하는 것은 아닌지, 즉 파동 함수 전체를 바라보는 관점에서 생각해볼 필요가 있는 것으로 보인다.

블랙홀에서 정보가 손실된다면, 속성이 존재를 충분히 기술 할 수 없는 상황, 즉 오직 지칭에 의해서만 대상을 나타내야만 하는 상황이 벌어질 수도 있다. 자연에 근본적으로 미결정성이 존재한다면, 이러한 현상은 역설적으로 자연 법칙의 틀 아래에서 어떻게 다루어져야 하는가? 지칭 또는 개념으로 신의 존재를 증명하고자 한 존재론적 논증도 다시 한 번 상기할 수 있는 것일까? 그리고 블랙홀에서 정보가 손실된다면, 자연의 법칙 및 초기 조건으로서의 신의 존재를 증명하고자 한 우주론적 논증은 실패하게 되는 것일까? 지금으로서는 이 두 가지 신 존재 논증에 대해 현대 물리학이 어떻게 답변을 하는지에 대해서 명확한 답을 말하기는 어렵다. 다만, 신학적 및 철학적 근본적인 논증이 현대 물리학에 어떤 방식으로 되풀이되고 있다는 것은 명백해 보이며, 이러한 질문들은 과학과 철학 및 신학이 함께 고민하고 연구해야 할 영역으로 남아있다.

좀 더 과감하게 블랙홀의 정보손실문제에 대한 필자의 가설, 즉 파동 함수 전체를 볼 수 있는 전지한 관찰자에게는 정보가 보존되지만, 준고전적 관찰자는 정보의 손실을 경험한다는 가설이 옳다면, 우리와 같은 준고전적 관찰자에게서 지칭의 가치 및 존재론적 논증이 가지는 철학적 의미를 다시 상기할 수 있을 것이며, 자연 법칙이 근본적으로 존재할 수 있다는 의미에서의 우주론적 논증도 인정할 수 있을 것이다. 다만, 우리가 그 근본적인 법칙을 재구성해내는 것은 불가능할 것이라고 생각할 수도 있을 것이다.

어떤 의미에서, 철학적으로 말한다면, 철학자들에게서 신의 존재는 우리 이성의 한계에서 발견할 수 있었던 것이었다. 우리가 지금까지 살펴본 바에 따르면, 한 편으로는, 현대 물리학이 이성의 한계에 도달할 정도로 진보했다는 것을 의미할지도 모른다. 여기에서 우리가 신의 존재를 (또는 부재를) 사로잡을 수 있을까? 아니면, 인간 이성이 한계를 발견한 그 곳에서 신의 영역이 남아있다는 것을 겸허히 받아들여야만 할 것인가? 필자는 후자의 답이 우리의 답이 될 것이라고 생각하지만, 이 문제는 좀 더 고민해야 할 것으로 우리에게 남아있다.

참고문헌

- Hawking, S. W. (1976). "Breakdown of predictability in gravitational collapse." *Phys. Rev.* D14(2460).
- Chen, P., Ong, Y. C. and Yeom, D. (2015). "Black hole remnants and the information loss paradox." *Phys. Rep.* 603(1-45).
- Ong, Y. C. and Yeom, D. (2016). "Black hole information loss: some food for thoughts." *Proceedings of LeCosPA2015* 590-596. [arXiv:1607.07053 [hep-th]]
- Almheiri, A., Hartman, T., Maldacena, J., Shaghoulian, E. and Tajdini, A. (2020). "Replica wormholes and the entropy of Hawking radiation." *JHEP* 05(013).
- Bouhmadi-Lopez, M., Brahma, S., Chen, C. Y., Chen, P. and Yeom, D. (2020). "Annihilation-to-nothing: a quantum gravitational boundary condition for the Schwarzschild black hole." [arXiv:1911.02129 [gr-qc]].
- Marolf, D. and Maxfield, H. (2020). "Observations of Hawking radiation: the Page curve and baby universes." [arXiv:2010.06602 [hep-th]].

논 찬 문		기독교학문연구회	
발표논문 제목	해결 또는 미해결?: 블랙홀 정보손실문제와 관련된 최신 논의들	발표자	염동한
		논찬자 (소속)	유재은 (한전 전력연구원)

우선 논문을 논찬자가 이해한 수준에서 간단히 요약하면 다음과 같습니다.

블랙홀은 행성의 중력 붕괴 (행성이 수축하면서 강한 압력에 의한 핵융합으로 에너지방출과정 후 질점의 부피가 0에 도달해 가는 것)에 의해 형성되면서 이전의 행성의 정보를 상실하게 된다. 물리학은 어떠한 경우에도 이 다음에 일어날 사건을 예측하는 학문 (양자역학도 확률을 통해 사건을 예측함)인데, 블랙홀에서의 정보의 손실은 예측 자체를 불가능하게 한다. 더 나아가 블랙홀의 증발 (블랙홀에서 열복사에너지를 방출하여 결국에는 소멸하는 과정)로 블랙홀 자체가 소멸된다. 여기서 발생하는 문제는 단순히 자연과학 이론의 실패를 야기하는 것뿐만 아니라 철학적 관점에서 보았을 때, 존재하던 어떤 것이 그 정보를 잃어버리고 소멸되면, 그 존재는 실재가 없어진 지칭으로만 구분하게 된다.

연구자는 “자연은 근본적으로 과거의 자료로부터 결정할 수 없는 것이되고, 속성은 존재를 지칭하기에 충분하지 않게 된다”는 문장으로 정보 손실의 심각성을 지적하고 있습니다. 연구자는 정보손실문제에 대한 다양한 해법들과 그에 대한 한계점을 논문에 요약 제시하였습니다. 가장 최근 이론인 레플리카 워홀을 통한 얽힘 엔트로피의 섬에 대한 이론은 정보가 호킹 복사에 의해 외부로 전달된다는 것입니다. 블랙홀을 기술하는 얽힘 엔트로피를 계산하면, 공간상으로는 블랙홀 내부의 자유도로 계산되나, 실제로는 블랙홀 외부의 자유도에 기여하는 엔트로피 섬이 있다는 것입니다. 이는 블랙홀의 내외부를 연결하는 워홀-레플리카 워홀에 의해 가능할 것이고 이를 통해 내외부가 적극적으로 상호 작용하므로 최소한 블랙홀의 정보를 추측할 수 있다는 것입니다. 이 이론이 일반적인 블랙홀에 적용될 수 있는지에 대한 여지가 있다고 연구자는 이야기하고 있습니다.

연구자가 지지하는 대안은, 우주 전체를 기술하는 파동함수는 정보를 보존하지만, 우리는 파동함수 전체를 볼 수없기 때문에 블랙홀에서 방출되는 정보를 인식할 수 없다는 것입니다. 우리는 정보의 손실을 사실상 경험하지만, 자연 법칙내에

서는 그 정보는 존재하고 다만 우리가 확증할 수 없을 뿐이므로, 그 이후의 영역을 신의 영역으로 겸허히 받아들이는 것으로 연구자 자신은 결론을 내립니다.

논문의 주제가 물리학 분야에서도 가장 어려운 천체물리분야에서 야기되는 정보손실의 문제를 다루고 있어서 논찬자가 논문을 정확히 이해하기 어려웠습니다. 결론 부분에서 이성의 한계에 도달한 현대 물리학의 끝에서 남아 있는 문제를 신의 영역으로 돌릴 것인가에 대한 질문으로부터 논문의 취지를 조금 이해할 수 있었습니다. 인간 이성의 한계를 보이고 하나님을 더 경외하게 하는 논문입니다.