

스티븐 호킹 ‘30년 전 오류’ 인정 의미 블랙홀도 ‘정보’를 유출한다

글_ 이수종 서울대학교 물리학과 교수 sjrey@pphys.snu.ac.kr

지난 7월 제17차 ‘일반상대론 및 중력(GR17)국제학술대회’에서 우리에게 잘 알려진 이론물리학자 스티븐 호킹(Steven W. Hawking) 교수가 자신의 30년 전 논문에 중대한 오류가 있었음을 인정하는 연구결과를 발표하면서, 전세계 매스컴의 초점이 되었습니다. 호킹은 30년 전 논문에서 어떤 주장을 내세웠으며, 다른 물리학자들은 이 주장을 어떻게 받아들였는지, 그리고, 이번에 발표한 요지는 무엇인지 알아보겠습니다.

30년 전 호킹 “블랙홀 존재 · 양자물리학 원리 틀려”

1975년 호킹이 발표한 논문은 전세계를 깜짝 놀라게 만들었습니다. 만일 세상에 블랙홀이 존재한다면 양자물리학의 원리가 틀린다고 주장하였기 때문입니다. 양자물리학이란 원자 혹은 이보다 더 작은 미시세계를 설명하는 기본법칙으로, 그 이론은 이미 20세기 초반에 플랑크, 드 브로이, 보어, 하이젠버그, 슈레딩거를 위시한 전세계 이론물리학자들의 탁월한 기여에 힘입어 완성되었습니다.

고대 이래, 사람들은 물질은 분자나 원자모형에서 보듯이 알갱이를 기본단위로 구성되었다고 간주하였습니다. 양자물리학의 핵심은 기본단위인 알갱이가 사실은 파동으로 행동할 수 있다는 사실입니다. 즉, 미시세계에서는 알갱이와 파동의 구분이 없고 사실은 동일한 기본단위일 뿐이죠. 반도체, 초전도체, 원자력, 레이저 등등 일상생활 속에 양자원리는 깊숙이 자리잡고 있으며, 따라서 양자원리는 이미 완벽한 물리법칙으로 정립되었다고 보았는데요, 호킹의 주장이 맞다면 이런 양자원리가 틀릴 수밖에 없다는 것이죠. 따라서, 호킹의 주장은 양자물리학과 이를 응용한 일상생활의 다양한 첨단기술에 숨어있는 문제점이 있음을 시사하는 것으로, 과연 그의 주장이 맞는지 아닌지 판명하는 것은 물리학을 떠나 현대과학의 가장 중요한 문제로 대두되었습니다.

사실 블랙홀과 양자물리학이 공존할 수 없다는 호킹의 주장은

지난 30년간 전세계 물리학자들 사이에서 가장 많은 논란을 야기시켰던 주제입니다. 흥미로운 사실은 이러한 논란을 거치면서 물리학의 새로운 패러다임들이 대두되었다는 것이죠. 가장 대표적인 것이 ‘끈이론(string theory)’이며, 이는 현재 물리학뿐 아니라 과학 전반에서 가장 빠르게 발전하고 있는 소위 떠오르는 과학(emerging science)의 대표주자로 자리매김하고 있습니다.

블랙홀은 빨려들어가면 나오지 못하는 암흑상태

먼저 블랙홀부터 알아보죠. 물체들끼리는 서로 잡아당기는 힘, 즉 중력이 작용합니다. 중력의 크기는 물체의 질량에 비례하기 때문에 천체나 우주와 같이 엄청난 질량을 가진 대상에 중력 효과는 훨씬 크게 나타납니다. 중력의 기원은 뉴턴(Issac Newton)의 만유인력법칙, 그리고 이를 시공간의 휘어짐으로 해석한 아인슈타인(Albert Einstein)의 일반상대론을 통하여 거시세계의 주요 기본법칙으로 인정되어 왔죠. 아인슈타인의 특수상



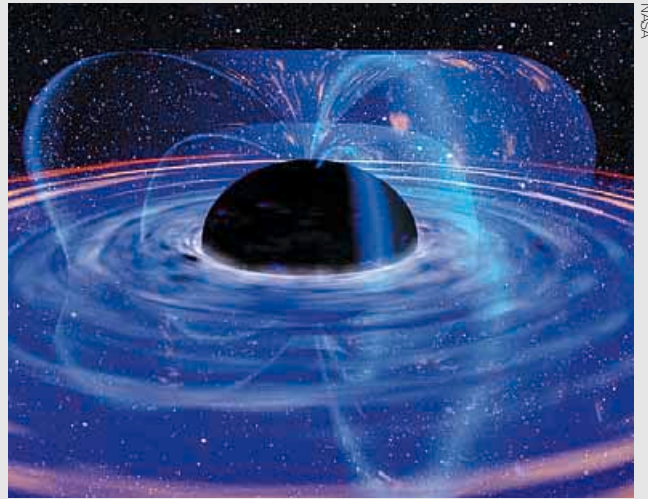
STSJ



블랙홀은 거의 무한대에 가까운 중력으로 빛을 포함한 주변의 모든 것을 빨아들인다

대론에 따르면, 질량은 에너지와 같습니다. 따라서 중력은 에너지를 가진 물질 사이에 작용하는 힘이라고 보면 되겠습니다.

블랙홀이란 질량이 아주 무거워서 블랙홀 중심에 놓인 물체가 블랙홀로부터 탈출하려면 빛의 속도보다 더 빨라야 빠져 나올 수 있는 물체를 말합니다. 아인슈타인의 특수상대론에 따르면 물체의 속도는 빛의 속도보다 빠를 수 없으므로, 블랙홀이란 한 번 빨려들어난 물체가 다시 빠져나오지 못하는 상태입니다. 빛조차 빠져나오지 못하므로, 멀리서 블랙홀을 바라봐도 깜깜할 뿐 블랙홀의 존재를 직접 알 수 없습니다. 물론 외부에서 블랙홀로 물체가 빨려 들어가며 나타나는 현상들은 관찰할 수 있으며, 바로 이런 방법으로 은하에 속해 있는 블랙홀의 존재를 비교해 알아보고 있습니다. 블랙홀에 빠져들지 않으면서 가장 가까이 블랙홀에 접근할 수 있는 거리를 블랙홀의 '지평면(horizon)' 이라고 합니다. 블랙홀의 중심을 감싼 공껍질이 지평면 모양입니다. 중요한 사실은 블랙홀이 깜깜하다는 결론은 블랙홀 주변의 물질들이 뉴턴의



NASA

블랙홀이 끌어들이는 가스는 블랙홀 주위를 도는 가스원반을 형성한다. 원반 안에서 회전하는 가스는 주위의 가스와 마찰을 일으키고, 그 결과 속도가 떨어져 블랙홀로 빨려 들어가게 된다.

만유인력과 아인슈타인의 일반상대론, 즉 거시세계의 자연법칙인 고전물리학의 원리에 따라 행동한다는 가정에 근거한다는 점 이죠.

양자물리학에선 “빛을 밝게 내뿜으며 점차 소멸”

블랙홀은 고전물리학의 관점으로는 깜깜하지만, 양자물리학의 관점에서는 밝게 빛을 내뿜으며 점차 소멸됩니다. 어떻게 빛을 내뿜을까요? 양자현상이 고전물리학과 가장 극명하게 대비되는 현상은 관통효과(tunnelling)입니다. 이는 고전관점으로는 에너지가 불충분하여 일어날 수 없다고 여겨지는 현상이 양자원리에 따르면 가능해지는 현상을 일컫는데요, 가장 대표적인 것이 장애물을 뚫고 양자물질이 통과하는 것입니다. 반도체 제조공정에서 사용되는 주사관통현미경(Scanning Tunnelling Microscope)은 바로 이 원리를 응용한 것입니다.

이제 블랙홀 주변에 알갱이와 파동의 성질을 모두 보일 수 있는 양자물질이 있다고 합시다. 그러면, 지평선 근처에서 양자원리에 따라 작은 에너지의 요동효과로 물질과 반대의 성질을 가지는 반물질이 생겨나고, 이중 반물질은 블랙홀로 흡수되어 블랙홀을 점점 소멸시키고, 물질은 지평선 밖으로 나와 빛으로 방출되는 것이지요. 호킹의 결과에 따르면, 블랙홀에서 방출된 빛은 빨강계 달구어진 쇠덩어리에서 나오는 빛과 같은 성질을 가진다는 것입니다. 이는 블랙홀에 온도와 엔트로피의 개념을 적용할 수 있다는 놀라운 사실을 내포하죠. 더군다나 놀라운 사실은 블랙홀은 3차원내의 구조물임에도 불구하고, 엔트로피가 블랙홀 지평면 안쪽의 부피에 비례하지 않고 단지 지평면의 면적에만 비례한다

【커버스토리】

는 사실입니다. 문제는 열을 복사하는 양자계는 ‘순수상태(pure state)’에 있을 수 없고 ‘섞인 상태(mixed state)’에 해당한다는 것입니다. 순수양자상태란 물질의 상호관계가 유지되는 상태임에 비하여 섞인 상태는 마구잡이로 섞여 그렇지 못한 상태입니다. 정보(information)는 상호관계를 나타내는 대표적인 물리량입니다.

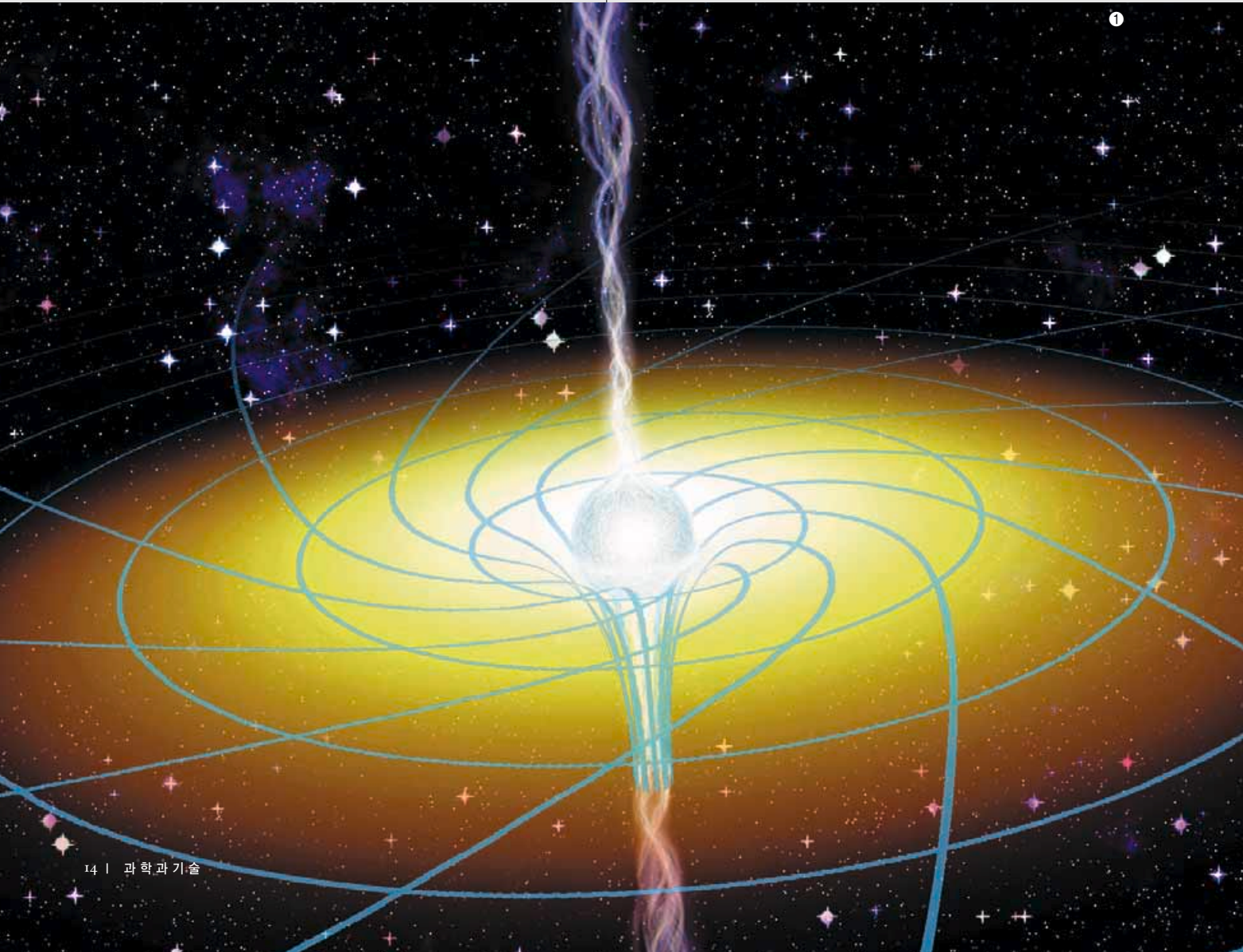
호킹, “블랙홀에선 양자확률 · 물질 보존 안된다”

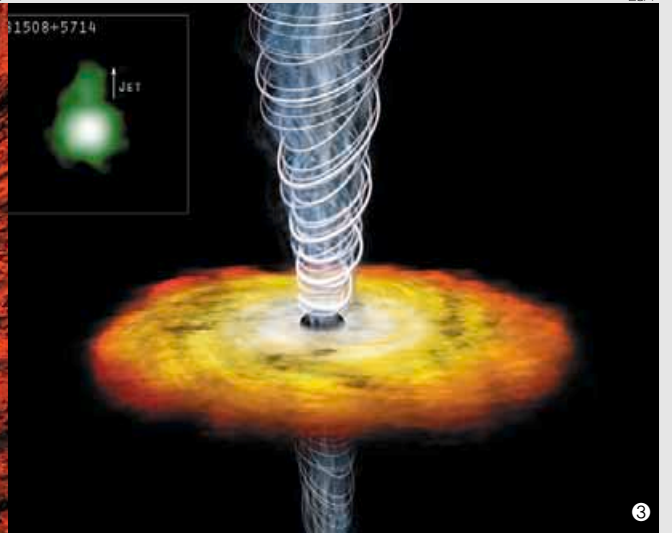
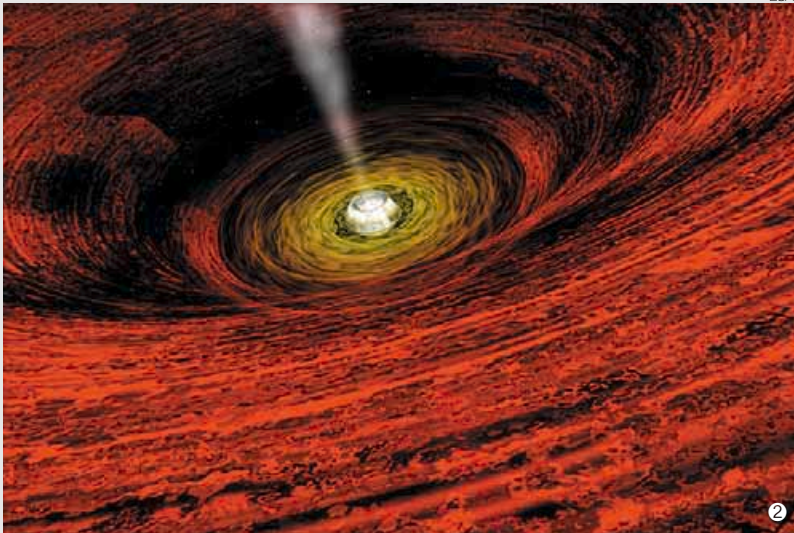
그럼 호킹의 30년 전 논리전개를 따라가 봅시다. 이제, 블랙홀에서 멀리 떨어진 지점에서 최인훈의 ‘광장’ 소설책을 블랙홀로 던졌다고 합시다. 멀리 떨어져 관찰하는 사람들이 이 소설책을 다시 받아볼 수 있을까? 소설책에는 최인훈씨의 너무나도 화려한 문체와 함께 수많은 ‘정보’가 숨어있지요. 예를 들면, 겉표지에

찍힌 최인훈이라는 글자들은 잉크를 구성하는 원자들의 상태가 규칙적으로 배열된 아주 특별한 상태입니다. 일반적으로 이런 상태는 정보이론(information theory)에 따라 설명할 수 있는데요, 정보란 간단히 말하여 상관관계가 유지된 양자물리계의 특별한 상태(correlated state)입니다.

이 소설책은 중력에 의하여 블랙홀로 빨려들어갈까요? 고전물리학의 관점에서, ‘광장’ 소설책은 지평면을 통과하여 들어가면 더 이상 우리에게 보이지 않을 것입니다. 그러나, 양자물리학 관점에서 블랙홀은 앞서 설명한 관통효과 때문에 빛으로 방출되어 나오게 되겠죠. 문제는 이 빛이 열복사 양자계이므로 섞인 상태이고 따라서 ‘정보’를 가질 수 없다는데 있습니다. 소설책의 층에 너지는 오래 기다리면 다시 복구할 수 있지만, 그 안에 적힌 내용 즉 정보는 모두 유실되어 없어진다는 것이죠. 이게 바로 ‘블랙홀

ESA





블랙홀에 정보(빛)가 빨려들어가는 장면을 형상화한 그래픽들 ①~③

의 양자정보유실' 문제입니다.

정보유실은 양자계에 있어서는 아주 심각한 문제입니다. 양자 현상의 기본원리는 통상 확률보존법칙으로 불리는 물질의 보존 법칙입니다. 순수상태는 확률을 보존하지만 섞인 상태는 그렇지 못합니다. 호킹은 이로부터 열복사를 보이는 블랙홀은 주변의 양자물질을 모두 섞인 상태로 바꾸며, 따라서 양자확률과 물질이 보존되지 않는다고 결론지었습니다. 간단히 말하면, 블랙홀로 인하여 통상적인 양자원리는 더 이상 성립하지 않는다는 것이지요. 우주진화 초기에는 원자보다 더 작은 블랙홀들이 무수히 많이 생성되었으리라는 정황적 증거가 있습니다. 그렇다면, 현재의 우주는 태초의 우주정보가 거의 모두 유실된 상태이겠죠. 여하튼, 호킹은 이러한 결론에 기초하여 “현재 우리가 사용하고 있는 양자역학은 모두 틀리고 새로운 양자역학법칙으로 바뀌어야 한다”라고 주장하였습니다. 호킹은 이렇게 혁신적인 주장을 내세웠지만, 도대체 기존 양자물리학원리의 어떤 부분이 어떻게 개선되어야 하는지, 아니면 전혀 새롭게 양자원리를 재구성해야 하는지 제시하지 않았습니다.

30년간 블랙홀이론 실험은 가능성 못찾아

다른 물리학자들은 호킹의 이러한 기상천외한 주장에 어떻게 반응하였을까요? 일단, ‘양자물리학원리가 틀린다’는 실험적인 증거는 적어도 실험 가능한 범위에서 그 당시나 지금이나 없었습니다. 물론 블랙홀이 아주 가까이에 있어야만 양자원리가 틀러지는 것을 비로소 관찰할 수 있게되는 가능성은 충분히 있습니다. 그러나 블랙홀 가까이에서 실험을 수행한다는 것도 어렵고 위험할 뿐 아니라, 현재의 기술수준으로는 거의 불가능한 실험입니

다. 그래서, 물리학자들은 수많은 논리실험(thought experiment)을 통해서 호킹의 주장에 대한 진위를 가리고자 노력하였으나, 지난 30년간 블랙홀 주변에서 양자물리학 법칙이 바뀌어야 할 단 하나의 ‘결정적 근거’도 확신할 수 없었습니다. 그래서, 호킹과 다른 물리학자들 사이에 긴 학문적 논쟁이 이어져 왔습니다. 수많은 물리학자들이 이 논쟁을 이끌어 왔지만, 가장 주목할만한 반론은 1999년 노벨물리학상을 수상한 네델란드의 티프트 교수가 주도한 것으로 휘어진 시공간의 양자장이론을 바탕으로 호킹의 주장이 논리적으로 맞지않음을 강하게 주장하였습니다.

‘끈이론’ 학자, 블랙홀 열역학계 미시상태 밝혀

그런데, 호킹의 주장이 성립되지 않음을 구체적으로 찾아낸 것은 바로 끈이론(string theory)이었습니다. 즉, 90년대 중반에 이미 끈이론에서 전기전하를 띠거나 회전하는 블랙홀과 같은 특별한 종류의 블랙홀을 특별한 물질의 응축으로부터 생성되는 과정을 밝힐 수 있었는데, 이는 블랙홀 열역학계의 미시상태, 즉 통계역학계를 찾은 것과 같은 혁신적인 발전이었습니다. 이를 통하여, 끈이론은 블랙홀의 복사 및 붕괴과정을 소상히 밝힐 수 있었으며, 특히 복사된 빛이 정확히 열복사가 아니고 일관성을 유지하며 정보를 전달하는 ‘거의’ 열복사와 비슷하게 행동하는 상태임을 밝혔습니다. 더군다나 미시상태는 전형적인 양자역학의 법칙에 의하여 설명되는 양자 게이지이론임을 끈이론은 구체적으로 밝힐 수 있었죠.

한발 더 나아가, 끈이론은 정보가 유지되는 비결은 블랙홀뿐 아니라 이와 반대의 성질을 갖는, 즉 모든 물질을 밀쳐내기만 하

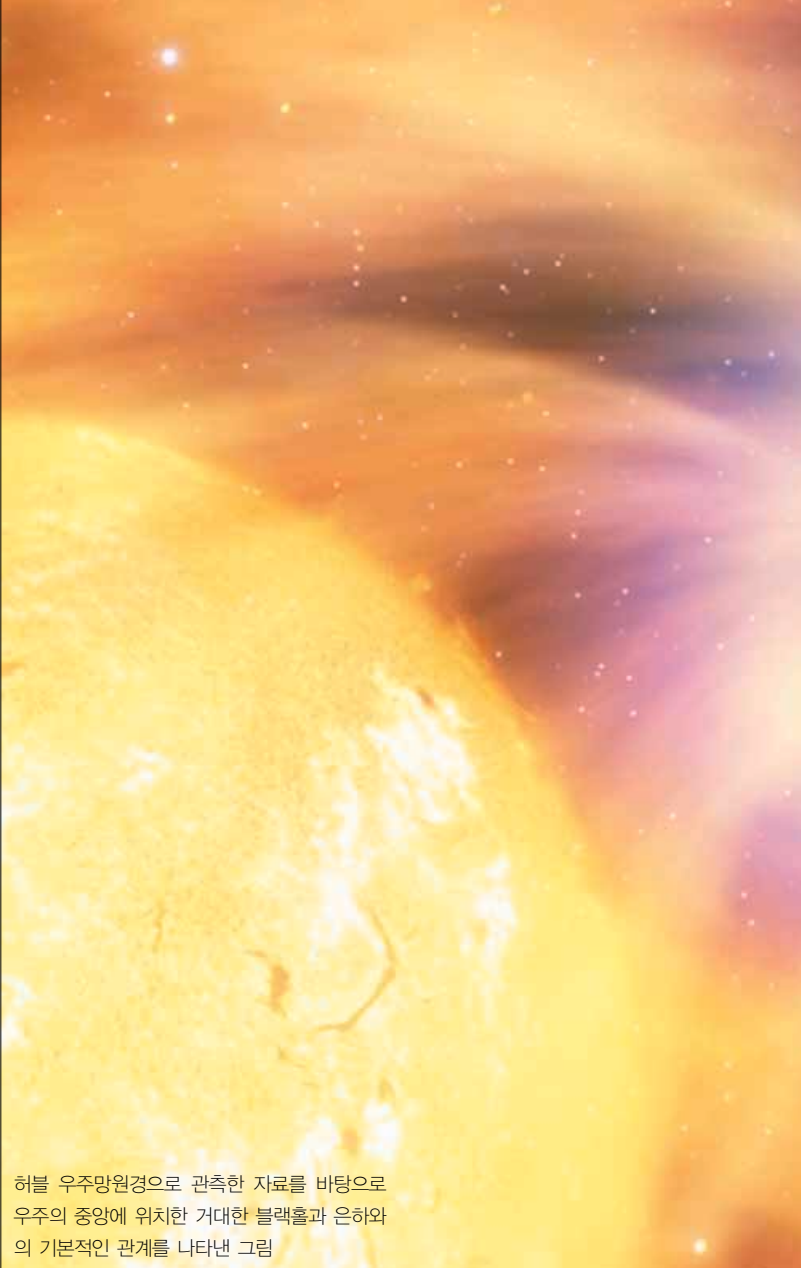
【커버스토리】

는 상태인 화이트홀 사이를 연결짓는 여러 가지 시공간구조가 서로 중첩되어 가능하다는 구체적인 해결 방법까지 제시하였습니다. 아인슈타인의 일반상대론이 틀리며, 이를 대신하는 이론으로 발전된 끈이론은 호킹의 블랙홀 이론도 틀렸음을 밝힐 수 있었던 놀랄 만한 물리학 법칙입니다. 그래서, 끈이론 학자들은 이미 호킹의 30년전 주장에 문제가 있음을 지적한 바 있습니다.

30년 전 주장 철회, 전통적인 양자역학법칙 인정

그렇다면, 이번 학회에서 호킹이 발표한 내용은 무엇인가요? 호킹은 금년도 학회에서 자신의 30년 전 주장, 즉 양자정보가 유실되며 양자물리학 원리가 근본적으로 바뀌어야 한다는 주장을 철회하였습니다. 즉, 전통적인 양자역학법칙이 계속 성립함을 인정한 것이지요. 흥미롭게도 그가 새롭게 보완한 내용은 끈이론에서 이미 제시한 해결방법과 거의 비슷합니다. 즉, 블랙홀에 적용되는 양자원리는 블랙홀을 포함한 시공간의 모든 가능한 기하학적 구조를 합성시켜 구성하는 것이 옳으며, 바로 이 부분이 30년 전 논리전개의 출발점과 다르다는 것을 제시하였습니다. 이에 따르면, 각각의 가능한 시공간 구조에서의 양자현상은 정보를 유실하는 것처럼 보이지만, 모든 가능한 시공간구조를 합성하면, 정보를 되찾을 수 있음을 끈이론의 연구결과를 바탕으로 재구성하였습니다. 이 경우, 블랙홀은 처음에는 열복사를 하며 붕괴하다가, 아주 작아 양자현상이 점점 더 중요해지는 시점에서는 더 이상 블랙홀로 존재하지 않고 ‘거의 블랙홀처럼 보이는’ 상태, 구체적으로는 지평면이 항상 존재하지 않고 일정 기간 유사한 구조를 보이다 소멸되는 상태로 구현된다는 겁니다. 정보는 모두 이 순간에 다 빠져 나올 수 있겠죠.

호킹의 새로운 연구결과는 아직 논문이 제출되지 않아 구체적인 검증이 이루어지지 않은 상태입니다. 그의 학회발표내용에 미루어 현재 물리학자들은 상당히 유보적인 입장을 가지고 있습니다. 일면 논리적 비약도 보이고, 수정이론의 근간이 끈이론에서 이미 밝힌 내용에 기초하였다는 이유 때문입니다. 더군다나, 호킹의 입장은 간단히 “이전의 내 주장이 잘못됐다”라고 선언만 하였을 뿐, 어떤 부분이 어떻게 틀렸는지 자세한 설명이 없습니다. “이전의 내 논문에서 이러 이러한 부분의 가정과 논리 전개에 모순이 있었고, 이를 수정하면 결과가 상당히 바뀌어 이전의 주장과 반대되는 결론에 도달한다”라고 말하는 것이 보다 타당하다는 것이 필자의 견해입니다.

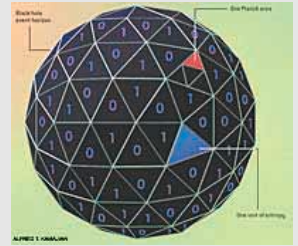
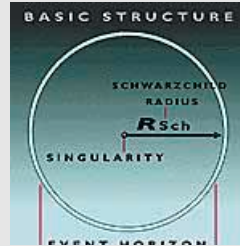
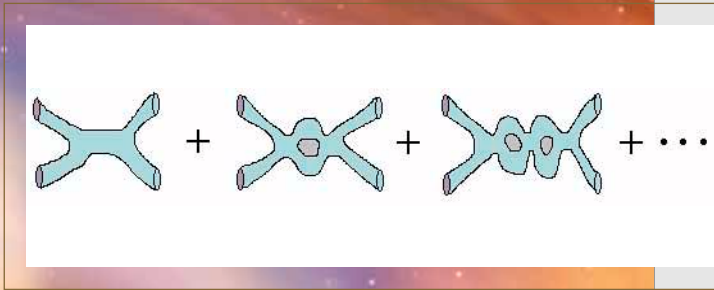


허블 우주망원경으로 관측한 자료를 바탕으로 우주의 중앙에 위치한 거대한 블랙홀과 은하와의 기본적인 관계를 나타낸 그림

SMM del IAC

“중력은 자연의 기본 원리 아니다” 서울대 끈이론 연구팀도 밝혀내

블랙홀과 중력의 정체는 이제 호킹의 바뀐 주장과 함께, 새로운 전기를 맞고 있습니다. 서서히 밝혀지고 있는 것은 중력이 더 이상 자연의 ‘기본’ 원리가 아니고 블랙홀도 더 이상 근본적인 물체가 아닐 것이라는 혁신적인 가능성입니다. 앞에서 밝힌 바와 같이 블랙홀의 엔트로피는 기대와는 달리 시공간 부피에 비례하지 않고 희한하게도 면적에 비례합니다. 이는 블랙홀의 미시구조가 3차원이 아니라 2차원에 국한되어 구성되고 있다는 점을 시사합니다. 이로부터 터프트는 1993년 ‘홀로그래피 원리’를 제창하였습니다. 즉, 3차원의 중력은 사실 2차원의 어떤 중력과 관련없는 물리계가 구현하는 현상이며, 우리는 단순히 이 현상만을 보고 중력을 지금까지 수천년 동안 우주의 가장 기본이 되는 힘이라고 믿고 있었다는 제안입니다. 마치 레이저를 이용하여 2차원



물리계에서도 나타나는 것은 그리 어렵지 않습니다. 어려운 부분은 이런 경우 확률보존성도 같이 나타남을 보이는 것입니다. 터프트는 고전계에 마찰현상(dissipation)과 파동 사이의 게이지 대칭성을 도입하면 보어의 해석을 자연스럽게 구현할 수 있음을 보였습니다. 그런데, 양자원리의 근원이 고전물리학이라는 것은 끈 이론이 이미 지난 90년대 중반에 이미 밝힌 사실입니다. 더군다나, 중력현상과 이를 자연스럽게 결부시켜, 양자물리학의 기본단위인 플랑크상수를 고전물리계의 시공간중 한 차원의 길이로 구현됨을 보였습니다.

30년간 논란, 21세기 첨단기술에 엄청난 파급효과

호킹 박사의 양자정보유실문제와 양자정보이론(quantum information theory)에도 많은 시사점을 던지고 있습니다. 사실이 분야는 호킹 박사의 연구그룹과 일련의 끈이론분야 이론물리학자들이 연구부산물(spin-off)로 발전시킨 분야입니다. 그런데, 앞서 설명한 홀로그래피 원리 및 양자원리의 정제등을 종합하면 몇 가지 흥미로운 결론에 도달할 수 있습니다. 즉, “어떤 양자컴퓨터도 가장 효율이 좋은 고전컴퓨터보다 높은 성능을 보일 수 없다”, 또 “양자컴퓨터의 성능에 가장 영향을 미치는 것은 엄청나게 작은 양자블랙홀이며, 이를 제거할 수 없다면 알고리즘의 속도를 엄청나게 지연시킨다” 등의 결론입니다. 아주 흥미롭게도 호킹 박사의 블랙홀과 양자정보유실문제는 언뜻 첨단기술과는 관계없는 다분히 학문적인 문제라고 느껴지겠지만, 사실 이 문제의 진위를 따지며 지난 30년간 발전시킨 이론물리학의 발전은 21세기 첨단기술의 발전에 엄청난 학문적, 기술적 파급효과를 가져다 주었다는 것입니다. 비록, 그의 30년 전 주장이 전적으로 틀렸을 지라도 말입니다. **SD**

홀로그래피에서 3차원 영상을 구성하는 경우와 비슷하죠. 원래, 이 원리는 중력이 가장 강력한 블랙홀과 같은 경우에만 나타난다고 믿었습니다. 그런데, 놀랍게도 최근에는 그렇지 않고 이러한 원리가 보편적으로 적용될 수 있음이 미국 오하이오주립대 끈이론 연구팀과 서울대 끈이론 연구팀에 의하여 각각 다른 경우를 통하여 밝혀졌습니다.

터프트는 이 홀로그래피 원리에 의거하여 양자물리학은 더 이상 가장 기본되는 물리법칙이 아니고 사실은 마찰현상을 일으키는 고전물리계가 오랜 시간 이후 보이는 현상이라고 주장하고 있습니다. 즉, 양자역학은 호킹의 주장과 같이 틀린 것은 아니었지만, 사실 자연의 기본법칙이 아니라는 겁니다. 양자현상의 기본 원리는 앞서 설명하였듯이 알갱이와 파동의 동일성과 확률보존성, 즉 물질보존성입니다. 사실, 알갱이와 파동의 동일성이 고전



글쓴이는 서울대학교 물리교육과를 졸업, 미국 캘리포니아 공과대학에서 석사 및 박사 학위 취득 후, 미국 샌타버버라 이론물리연구소 연구원, 예일대학교 연구교수, 프린스턴대학교 연구교수를 지냈다.