

스핀구름 응축을 통한 새로운 양자 물질 최초 발견

2023.2.6.(월) 11:00, 윤성훈 기초연구진흥과장(과학기술정보통신부)

<윤성훈 과학기술정보통신부 기초연구진흥과장>

안녕하십니까? 과기정통부 기초연구진흥과장 윤성훈입니다.

기초연구는 장기간에 걸쳐서 다양한 분야에 응용되고 또 새로운 산업 창출과 삶의 질 향상에 기여하고 있습니다.

하지만 가시적인 성과 측정이 어렵고 결과가 나오는 데 오랜 시간이 필요해서 지속적이고 장기적인 지원이 필요한 영역입니다.

저희 과기정통부는 연구에 대한 의지와 역량을 갖춘 연구자분들께서 자율적으로 꾸준히 장기적으로 연구할 수 있는 환경을 조성하기 위해 노력하고 있습니다.

내일 새벽 네이처피직스에 게재되는 동국대학교 임현식 교수님의 연구 결과 또한 지난 수년간 꾸준히 연구를 이어온 끝에 달성한 소중한 성과입니다.

네이처피직스는 물리 분야에서 세계적으로 권위 있는 학술지 중 하나이고요. 교수님의 연구 성과는 그동안 학계에서 보고되지 않은 새로운 양자 물질을 발견했다는 측면에서 학문적 의미가 매우 크다고 생각합니다.

연구업적 및 성과에 대한 자세한 내용은 임현식 교수님께서 설명해 주시겠습니다.

이상 인사 말씀 마치겠습니다. 감사합니다.

<임현식 동국대학교 물리반도체과학과 교수>

안녕하십니까? 동국대학교 물리반도체과학부 임현식입니다.

제가 오늘 말씀드릴 내용은 '스핀구름 응축을 통한 새로운 양자 물질'에 관련된 연구 내용입니다.

영문 제목은 'Observation of Kondo condensation in a degenerately doped silicon metal'이고요. 내일 자로 '네이처피직스'라고 하는 논문에 실리게 되어 있습니다.

연구 결과의 과학적 의미부터 먼저 설명드리도록 하겠습니다.

본 연구는 고체 물질 내에서, 특히 금속에서 스핀구름을 이용한 새로운 보스·아인슈타인 응축 현상을 발견하는 것이라고 볼 수 있습니다.

본 연구에서 응축 대상은 스핀구름, 다른 말로 하면 콘도구름이라고 하는 실리콘 금속에 형성된 자성 불순물과 주변 전자들이 만들어 내는 순수스핀이 재료인 보존 같은 준입자를 이야기합니다.

여기서 보스·아인슈타인 응축은 보존입자, 대표적으로 빛이라든지 아니면 헬륨 같은 것들이 극저온에서 같은 에너지 상태를 공유해서 새로운 양자 물질 상태가 되는 그러한 상태를 의미하고요.

몇 년 전에 원자들을 이용한 류비덤 원자들을 이용한 보스·아인슈타인 응축 현상으로 해서 노벨상을 받은 적이 있습니다.

먼저 간략하게 보스·아인슈타인 응축이 무엇인지에 대해서 애니메이션을 준비했는데요. 여기서 먼저 응축이라고 하는 보통 현상은, 응축은 기체 상태에서 액체 상태로 물질 상태의 변화를 의미하는 것이고요.

본 애니메이션이 보여 주는 것은 원자들이 온도가 높을 때 각각의 운동 에너지를 가지고 이렇게 움직입니다. 그런데 점점 온도가 내려감에 따라 이러한 입자들이 에너지가 점점 낮아지게 되고, 이 입자들이 보존이라고 하면 점차 온도가 낮아짐에 따라서 이러한 입자들이 서로 응축되는, 다시 말해서 기체 상태에서 빠르게 움직이는 단일입자의 기체 상태에서 점점 액체 같은 응축된 상태로 되고, 궁극적으로 물질 특성이 새로운, 완전히 양자역학적인 그런 특성이 나타나는 그러한 응축 상태가 됩니다.

이러한 현상을 보스·아인슈타인 응축이라고 하고요. 꽤 오래전에 보스라는 과학자하고 아인슈타인이 예견을 했었습니다.

본 연구에서 보스·아인슈타인 응축, 새로운 응축 현상을 발견하기 위해서 사용한 소재는 잘 알려진 실리콘 반도체 소재입니다.

이 실리콘 반도체를 인이라고 하는 그러한 불순물로 굉장히 많이 도핑을 하게 되면 반도체 특성에서 금속 특성으로 변화를 하게 되고, 여기서 보이는 것은 일반적으로 사용되는 실리콘웨이퍼고요. 저희도

이러한 특별한 웨이퍼가 아닌 일반적으로 사용되는 이러한 실리콘웨이퍼를 사용했구요.

저희가 사용된 실리콘에 그러한 원자 수준에서의 배열, 또 이걸 갖다가 TEM이라고 얘기하는데요. 이렇게 작은 알갱이, 알갱이 하나 하나가 실리콘 원자를 나타내는 거고 여기에 인이라고 하는 것을 도핑하는 것입니다.

여기서 보며 이 사진을 조금 더 확대한 건데요. 여기서 보면 까만색으로 보이는 것들이 실리콘 원자, 원자 사이사이에 박힌 그러한 인 불순물이 되고요.

이러한 인 불순물들이 굉장히 많을 때는 이러한 실리콘 반도체가 반도체적 특성에서 금속인 특성으로 변화하게 됩니다.

이 본 연구의 핵심은 이러한 금속 특성, 아주 인이 많이 도핑된 그러한 실리콘을 이용해서 금속에서 새로운 양자역학적인 보스·아인슈타인 응축 현상을 발견하는 것이라고 볼 수 있습니다.

실리콘 안에 있는 자성 불순물들을 도식화한 그림입니다. 이 실리콘들을 자성 입장에서 자세하게 관측해 보면 여기 얼음같이 된 게 실리콘이고요. 이 얼음이 마치 전자들을 많이 포함하고 있는 것이고요. 이러한 전자가 많이 모여 있는 그러한 전자 바다에 이렇게 인이 도핑될 경우에 다음과 같이 스핀이라고 하는 자성 불순물들이 도핑된 것과 똑같은 현상입니다.

저희가 사용된 피도핑된 단결정 실리콘 같은 경우에는 이러한 자

성 불순물들의 농도가 대략적으로 10의 15승 정도, 한 큐비트 cm당 10의 15승 정도 돼 있고요. 이러한 자성 불순물들의 사이가 대략적으로 1 μ m 아래인 것으로 돼 있습니다.

스핀구름에 대해서 간략하게 또 설명드리도록 하겠습니다.

이런 식으로 실리콘에 자성 불순물들이 존재하게 되고 온도가 점점 낮아지게 되면 이러한 자성 불순물들의 자성 특성을 상쇄시키기 위해서 주변에 있는 전자들, 여기서 움직이는 것들은 전자를 얘기하는 것이고요. 화살표는 전자가 가지고 있는 스핀을 얘기하고 있는 것입니다.

이러한 자성 불순물들이 금속성 물질에 존재하게 되면 주변의 전자들이 이러한 자성 불순물들의 자성을 없애기 위해서 반대 방향의 스핀을 가진 많은 전자들이 에워싸게 됩니다. 이러한 것을 스핀구름이라고 얘기하고요. 이러한 스핀구름을 다른 말로는 콘도구름이라고 얘기합니다. 일본에 있는 콘도라고 하는 과학자가 제일 처음 이러한 현상을 예견했고요.

지금까지 콘도구름에 대한 현상은 많이 이론적으로나 실험적으로 예견돼 있었지만 실질적으로 콘도구름이 어떻게, 얼마만큼의 길이를 가지고 확장될 것인가 하는 논문은 최근 들어서 나왔고요. 네이처지에 2020년에 나왔었고 그것도 단일 콘도구름의 길이가 대략적으로 μ m 까지 갈 수 있다, 라고 하는 게 최근 들어서야 밝혀진 것이고요.

본 연구의 핵심은 이렇게 금속 안에 있는 자성 불순물들이 주변에 있는 전자들에 의해서 서로 가려질 때 이렇게 하나의 스핀이, 이 영

역 안에서는 순수한 스핀이 제로인 것이고요. 이런 것을 스핀구름이라고 하고, 이러한 스핀구름들이 서로 굉장히 다닥다닥 붙어 있어서 하나의 응축 상태, 기체가 아닌 응축 상태처럼 되게 되면 이러한 응축 상태가 새로운 양자역학적인 그러한 현상을 나타내게 됩니다.

그래서 이러한 새로운 양자역학적인 상태를 저희는 이러한 금속의 전기전도도와 그다음에 상태 밀도 함수라는 그러한 측정법을 이용해서 관측하였습니다.

여기서 보이는 그림은 제가 사용한 이러한 전기전도도의 변화를 측정하기 위한 실험 기자재고요. 실험은 공동연구기관인 영국에 있는 랑카스터대학에서 측정하였습니다.

실험 방법은 간단합니다. 이러한 실리콘 금속 막대를 양 단에 전류를 주고 전압을 측정함으로써 저항 변화를 측정했고요. 온도가 쪽 낮아짐에 따라 일반적인 금속은 다음과 같이 주황색의 특성을 나타내게 되는데, 이렇게 자성 불순물 주변의 전자들이 서로 스크리닝하게 되면 전자들의 흐름이 방해되기 때문에 다음과 같이 전기전도도, 다시 말해서 저항이 올라가게 됩니다.

그리고 온도가 점점 낮아지게 돼서 이러한 스핀구름들이 서로 오버랩이 되면, 다시 말해서 서로 응축이 되면 다시 전기전도도가 낮아지게 되는 그러한 특성을 보이게 되는 것이고 저희가 정확하게 그러한 특성을 측정했습니다.

또 다른 특성 중의 하나는 상태 밀도라고 하는 함수입니다. 어떠한 양자 물질 상태에서는 그 양자 물질이 가지는 고유한 전자의 상태

밀도라고 하는 것이 바뀌어지게 됩니다. 그래서 저희는 다음과 같은 소자 구조를 제작하였고요. 이 소자는 공동연구기관인 한양대학교 김은규 교수님 팀에서 제작하였고요. 측정은 또 다른 국제 공동연구기관인 RIKEN, 일본의 이화학연구소에서 측정하였습니다.

다음과 같이 마치 실리콘에 형성된 보스·아인슈타인의 응축 상태가 초전도 상태와 비슷한 그러한 상태 밀도 함수라는 것을 저희가 측정하였고요. 이러한 특이한 상태 밀도 함수라는 것은 저희가 발견한 이 물질에서의 양자 상태가 마치 초전도 상태, 다시 말해서 스핀이 제로인 쿠퍼 페어 상태와 동일한 상태임을 간접적으로 얘기해 주고 있습니다.

따라서 요약을 하게 되면 본 연구는 상태 밀도 함수 및 전기전도도 측정을 통해서 실리콘 금속에서 스핀구름들의 보스·아인슈타인 응축 현상을 세계 최초로 발견했다는 것에 의미가 있고요.

그다음에 추가적인 연구 및 원리 규명을 통해서 저희가 사용한 금속 이외에 조금 더 포괄적인 금속을 사용하게 되면 이 원리에 대해서 조금 더 자세하게 알 수 있을 것 같고, 그리고 새로운 양자역학적인 그러한 센서 및 또는 양자컴퓨터에 대한 기본적인 응용에도 적용될 수 있을 것으로 저희는 기대하고 있습니다.

공동연구기관은 다음과 같습니다. 감사합니다.

[질문 · 답변]

※마이크 미사용으로 확인되지 않는 내용은 별표(***)로 표기하였으니 양해 바랍니다.

<질문> 아까 전에 응축됐을 때 부분에서 결국은 그게 양자적인 성격이 더 강화된다는 부분 말씀하셨는데, 실제로 양자적인 성격이 응축됐을 때 양자 얽힘이라든지 양자적인 성격을 어떤 식으로 확인했는지 이게 이해가 안 돼서, 그게 첫 번째 질문이고요.

두 번째는 활용도 측면에서 센서라든지 다양한... 일부 활용될 수 있는데 아까 전에 혹시 이게 웨이퍼나 반도체 분야로 활용될 수 있는 부분이 있는지 그 부분이 궁금합니다. 이상입니다.

<답변> (임현식 동국대 물리반도체학과 교수) 방금 좋은 질문해 주셨고요. 이 콘도구름 또는 스핀구름이라는 것 자체가 양자 얽힘에 의한 상태입니다.

다시 말해서 금속에 있는 자성 불순물의 자기적인 특성을 상쇄하기 위해서 주변에 있는 전자들이 집단적으로 이 자성 불순물의 스핀을 상쇄하게 되거든요. 이러한 현상 자체가 양자 얽힘에 의해서만 기술될 수 있는 상태가 되고요.

이게 콘도구름이, 아니면 스핀구름이 서로 완전히 따로 띄엄띄엄 있을 때는 어떠한 양자역학적인 상태를 나타내지는 못합니다. 다만, 이러한 구름들이 너무 가까이 붙어 있어서 전체의 소재가, 소재가 이런 식으로 양자 얽힘 현상으로 기술될 수 있으면 그 자체의 특성은, 물리적인 특성, 다시 말해서 전기전도도라든지 아니면 상태 밀도 함수를 이해하기 위해서는 반드시 양자역학적인 그러한 이해를 통해서

만 우리가 알 수 있게 되는 거고요.

그래서 다시 말해서 본 소재 자체가 양자역학적인 그러한 소재다, 라고 말씀드릴 수 있는 것은 이 소재 자체의 응축 대상 자체가 양자 얽힘에 의한 상태가 되는 거고, 이러한 양자 얽힘 상태가 전반적으로 소재 전부 다 퍼져 있는 거기 때문에 이 소재 자체가 양자역학적인 그러한 물질이다, 라고 말씀드릴 수 있게 됩니다.

그리고 이러한 현상을 측정하기 위해서는 이러한 양자역학적인 특성이 되면 금속에서의 전기전도도나 아니면 열전달계수라든지 아니면 홀측정에 의한 모빌리티, 아니면 이동도라고 말을 하죠. 이동도라든지, 아니면 방금 말씀드린 상태 밀도 함수 그런 것들이 변하게 되는 것이고요. 그러한 변화를 저희가 실질적으로 전기전도도를 통해서 측정하고 상태 밀도 함수를 통해서 측정한 게 본 연구의 핵심입니다.

그리고 반도체에 응용하는 것은 여기 보시면 온도, 예를 들어서 18mK 아주 굉장히 극저온에서 측정했는데요. 이렇게 18mK, 75mK이 -273℃거든요. 이러한 굉장히 낮은 온도에서 어떠한 전기전도도가 변할 수 있다는 얘기는 어떠한 특정 분야에서 온도 센서라든지 아니면 자기장 센서로 활용될 수 있다는 것을 얘기하는 것이고요.

그다음에 마지막에 양자컴퓨터에 응용될 수도 있다고 했는데 실질적으로 콘도구름, 예를 들어 스핀구름 하나 자체가 어떠한 얽힘에 의한 독립적인 상태가 되고요. 이러한 독립적인 상태를 우리가 제어할 수 있으면 실질적으로 양자컴퓨터의 핵심인 그러한 큐비트 소자에도 응용할 수 있을 것으로 현재 예상하고 있습니다.

<질문> (사회자) 온라인 통해 들어온 질문 대신해서 전달해 드리겠습니다. 뉴스1 기자님 질문입니다. 스핀구름 응축으로 나타나는 새로운 양자 물질상에 대한 이번 연구가 발전한다면 고온 초전도체 연구와 구체적으로 어떤 관련이 있을지 궁금합니다.

그리고 초전도체는 쿠퍼-쌍으로 설명을 많이 하는데 쿠퍼-쌍이 없는 초전도체는 무엇인지 부연설명 부탁드립니다, 보도자료에서 이번 양자 물질 상태가 쿠퍼-쌍에 없는 초전도체와 유사하다는데 향후 신종 초전도체 예측에 기여할 수 있을지 궁금합니다.

<답변> (임현식 동국대 물리반도체학과 교수) 고온 초전도체 현상 자체를 이해하는 게 굉장히 어렵습니다. 고온 초전도체가 발견되고 나서 실험적으로나 이론적으로 많은 연구가 진행돼 왔었는데요. 실질적으로 정확한 메커니즘을 이해하지는 못하고 있습니다.

다만, 고온 초전도체에서 보이는 특성 중의 하나가 이러한 스핀구름들이 연관돼 있다, 라고 하는 그런 보고가 굉장히 많습니다. 다만, 고온 초전도체에서의 스핀구름들은 그 구름 사이즈가 굉장히 작고요. 그다음에 주기적인 격자 모양을 하는 경우가 많은데, 저희 같은 경우는 일반적인, 그러한 스핀구름과 관련된 그러한 일반적인 연구입니다.

다시 말해서 스핀구름들의 배열이라든지 아니면 스핀구름들의 크기를 저희가 나중에 후속 연구를 통해서 조절할 수 있으면 현재 이해하지 못하는 고온 초전도체에서의 특성을 저희 연구를 통해서 어느 정도 이해하는 데 기여할 수 있을 것으로 저희가 기대하고 있고요.

조금 전의 두 번째 질문 관련해서는 초전도체에서의 보통 쿠퍼 페

어라고 하는 전자의 쌍은 전자의 스핀과 스핀 업이 돼서 2개의 전자 쌍이 완전히 스핀을 상쇄하게 됩니다. 그래서 쿠퍼 페어 쌍 자체에도 스핀이 없는 보존과 같은 상태가 되고요.

저희가 연구하는 대상, 이러한 스핀구름도 전체적으로 보면 자성 불순물 주변의 전자들이 자성 불순물들의 스핀을 상쇄하기 때문에 이 단일 콘도구름 하나 자체는 순수한 스핀이 없는 그러한 쿠퍼 페어와 마찬가지로인 상태가 되고요.

따라서 이러한 콘도구름 자체 하나를 쿠퍼 페어는 아니지만 움직이지 못하는 그러한 순수스핀이 제로인 준입자로 볼 수가 있습니다. 이러한 연관성 때문에, 이러한 연관성 때문에 실제 저희가 발견한 특정한 이러한 상태 밀도 함수가 초전도체에서 보이는 상태 밀도 함수와 매우 유사합니다.

실질적으로 저희가 계산한 결과에 의하면 BCS theory라고 하는 초전도체를 이해하는 데 필요한 theory에 의한, 그런 이론에 대한 상태 밀도 함수와 저희가 저희 응축 상태를 기술하는 상태 밀도 함수의 이론이 거의 동일합니다.

그래서 저희가 이렇게 얘기하는 이유 자체가 특성, 이러한 물리적인 특성 및 발견된 특성이 초전도체에서의 쿠퍼 페어와 매우 유사하다고 말씀, 주장하는 이유도 같은 맥락입니다.

<질문> 보면, 공동연구를 하신 데가 RIKEN이나 아까 영국이었나요? 같이 하신 것으로 되어 있는데 이게 그러면 실험이나 이런 것들을 다 해외에서 진행하신 건가요?

<답변> (임현식 동국대 물리반도체과학과 교수) 아닙니다. 실질적으로 제가 이 연구한 게 한 7년 정도 되고요. 처음에 양자컴퓨터를 개발한다고 해서 제가 NEC, RIKEN이라는 그러한 아주 우수 연구기관에 파트타임으로 고용이 됐었거든요. 그래서 받은 한국에 있었고 받은 일본에서 연구를 진행했었다가 처음에 할 때는 실리콘에 대해서 어떠한 특성에 관심 있는 게 아니라 실리콘 위에 성장된 알루미늄에 대해서, 아니면 다른 물질에 대해서 관심이 있었었는데 측정을 해보다 보니까 엉뚱한 실험 결과가 나왔고 이러한 실험 결과가 어떤 건지에 대해서 궁금해서 계속 하다 보니까 이러한 새로운 응축 현상을 발견하게 됐고요.

여기서 측정된 이 주요 결과는 그 당시 한국표준과학연구소에서 측정했었고요. 그다음에 추가적인 실험은 랑카스터대학이나 일본 이화학연구소에서 측정했습니다. 그리고 소자 자체는 한국 한양대학교, 아까 말씀드렸듯이 김은규 교수님 방에서 제작을 했고요.

그래서 실질적으로는 실험, 측정된 실험 기관이나 소자를 만든 기관, 분석한 기관이 전부 다 한국 기관으로 주로 많이 이루어졌습니다.

<질문> 스핀구름 존재 자체가 2020년대에 일본 이화학연구소라든가 홍콩 성시대 이런 데서 규명을 한 것으로 알고 있는데 이번 연구는 그런 스핀구름 존재를 이미 알고, 알면서 그것을 응축한 연구로 완전 별개의 연구라고 보면 되는 건지 일단 좀 궁금하고요.

그리고 보통 새로운 물질을 발견했다고 하면 쉽게 말해서 이름을 붙인다거나 새로운 의미를 부여할 텐데 이번에 그러지 못했던 것은

아까 말씀하신 것처럼 보스·아인슈타인 그런 특성을 갖고 있기 때문에 그런 건지 궁금하고요.

마지막으로, 아까 활용도 측면에서 여러 가지 센서라든가 이런 데, 반도체라든가 이런 데 응용될 수 있다고 해주셨는데 그것을 조금만 더 쉽게 설명해 주실 수 있을까요?

<답변> (임현식 동국대 물리반도체과학과 교수) 알겠습니다. 아마 측정 데이터는 이게 7년 전에 했으니까 2020년에 나온 RIKEN 연구소보다 저희 데이터가 더 아마 오래된 데이터인 것 같고요. 저희가 해석을 좀 못 했었습니다, 그동안. 실험을 꾸준히 했었고 새로운 데이터 다 보고 아무도 예측하지 못한 데이터다 보니까 학계에서 인정받기가 굉장히 어려웠고요.

2020년에 나온 네이처 논문은 우리나라의 과기원의 심홍선 교수님이라고 이론 하시는 분도 주 저자로 참여가 돼 있으셨고요. 그 논문이 나오고 나서 콘도구름들, 다시 말해서 스핀구름의 크기가 실질적으로 몇 μm 까지 확장될 수 있다, 라고 하는 그런 결정적인 실험이었고요.

저희가 그 논문을 보고 나서 저희가 똑같은 시스템인데 저희 같은 경우에는 스핀구름을 형성할 수 있는 그러한 자기 불순물들이 굉장히 많은 상태였고요. 그것을 이론적으로 계산해 보니까 조금 전에 설명드렸듯이 저희 시료의 불순물 간의 거리가 $1\mu\text{m}$ 가 안 됩니다. 그런데 콘도구름이 $1\mu\text{m}$ 이상까지 커질 수 있으면 저희 시료는 콘도구름으로 다 뒤덮일 수 있다는 것을 저희가 예측할 수 있었고요.

그래서 그 당시 2020년에 네이처에 남은 논문은 콘도구름 1개에 대한 실험이었고 저희는 그러한 콘도구름들이 집단적으로 뭉쳐져 있으면, 마치 기체에서 액체 상태로 응축되는 것처럼 보이면 다음과 같은 새로운 보스·아인슈타인 형태의 응축 현상과 같다, 라는 것을 저희가 제시한 연구입니다.

저희가 이름을 붙일... 다르게 붙일 수는 없었고요. 왜냐하면 이러한 콘도구름, 다시 말해서 스핀구름에 대한 기본적인 특성은 1930년대에 일본에 있는 주노 콘도라고 하는 과학자가 예견을 했었습니다.

그래서 저희 영문 제목 자체도 ‘Observation of Kondo condensation’이라고 붙은 게 그거고요. 실질적으로 콘도라고 붙인 거는 물리적인 기본 물리 자체가 콘도라고 하는 과학자가 얘기를 했고, 다만 condensation하고 응축과 관련된 것은 없습니다. 그래서 ‘Kondo condensation’이라는 단어 자체가 저희가 처음으로 만들고 처음으로 제시한 그러한 단어가 되고요.

그다음에 마지막으로 응용하는 것 관련해서는 저희 응축 상태, 이런 보스·아인슈타인 응축 같은 경우는 극저온에서만 일어나는 주로 현상입니다. 그런 양자역학적인 현상이 되는 거고, 점점 온도가 내려감에 따라 어떠한 특정한 물리량, 그게 저항이 됐든 아니면 다른 열전도도가 됐든 그러한 특정한 물리적인 파라미터가 급속하게 변화됩니다.

어떠한 적은 변화, 적은 온도의 변화라든지 적은 자기장의 변화 또는 압력의 변화에 따라서 어떠한 물리량이 급속하게 변할 수 있으면 굉장히 민감한, 센서티브한 특정 분야의 센서를 제작할 수 있고요.

그다음에 이런 콘도구름 자체가 하나의, 아까 설명드렸듯이 양자 역학적인 그러한 단일체하고 똑같습니다. 그래서 만약에 콘도구름들을 서로 우리가 상호 작용하게 만들 수 있으면 그 자체가 양자컴퓨터의 기본이 되는 큐비트로도 응용 가능할 수 있을 것 같습니다.

<답변> (사회자) 추가 질문 없으시면 브리핑을 마치도록 하겠습니다.

감사합니다.

<끝>