제4장. 양자역학 : Q&A-2

양자역학 이해에 관한 학생들 질문 이야기 2

녹색아카데미에서 책『**장회익의 자연철학 강의**』의 이해를 도울 대담 영상을 준비하였습니다. 장회익 선생님과 '자연철학'에 대해 이야기를 나누는 이 영상은 2020년 경희대학교 교양강좌 [철학자를 위한 물리학] 수강생들의 공부를 돕고자 제작되었습니다. 또한 이 동영상이 장회익선생님의 책에 관심을 가진 분들 누구에게나 좋은 참고자료가 되리라 기대합니다. 더 자세한 내용은 책과 녹색아카데미 웹사이트를 참고해주세요.

2021년 4월 6일. 녹색아카데미

"장회익의 자연철학 이야기" 5-7편[1]은 제4장 양자역학 내용에 대한 학생들의 질문을 가지고 이야기를 나눕니다. 이 편에서 다룬 내용은 아래와 같은 것들입니다.

목차

1. 양자역학의 필요성 & 변별체
2. 상태함수, 성향, 확률
3. 점유 개념 vs 성향 개념
4. 고전역학적 바탕 관념과 양자역학적 바탕 관념
5. 푸리에 변환 : 시간-공간 & 운동량-에너지
6. 광전효과
7. 빛의 세기와 에너지는 어떻게 다른가?
8. 양자역학은 어느 수준까지 적용할 수 있는가?
9. 양자역학과 다이아몬드 & 반도체
10. 슈뢰딩거의 고양이

바로가기 링크

자연철학 세미나 게시판
유튜브 대담영상 녹취록 목록
녹취록 전체 목록 : 대담영상 & 세미나
녹색아카데미 유튜브 채널
자연철학세미나 녹취록 목록

[1] ※대담 참석 : 장회익선생님, 최우석, 황승미. ※대담 녹화 : 2020년 5월. ※녹취록 작성 : 2021년 4월 6일.
※명조체, 구분점(·) 부분 : 장회익선생님 말씀, 〈최〉 : 최우석 질문, 〈황〉 : 황승미 질문, ( ) 안은 녹취자가 넣은 내용.

양자역학 이해에 관한 학생들 질문 이야기 2

1. 양자역학의 필요성 & 변별체

<학생 질문> 현재 우리 세계는 변별체로 가득한 세계라고 볼 수 있는데, (그렇다면) 고전역학적으로 충분하지 않은가? 양자역학의 필요성은 무엇인가?

<최> 이 질문은, 저희가 양자역학적인 문제를 다룰 때, 사실은 이 세계는 변별체로 가득 차 있기 때문에 어떤 존재물 하나를 양자역학적으로 서술하기 위해서는 변별체를 완전히 통제할 수 있는 상태로 만들어놓고 하거나 아니면 변별체로 가득찬 세계에서는 통계역학적으로 서술하는 게 훨씬 더 현실적이고 편리하다고 할까...

- 지금 그 얘기는 변별체의 의미를 전혀 다르게 곡해하고 있다. 변별체라고 하는 것 자체는 안 보이는 것이다. 대상을 볼 수 있게 사건을 일으켜주는 것이 변별체다. 변별체 혼자 있다면 그건 변별체도 아니다.
- 그러니까 어떤 대상이 있을 때, 그 대상이 현상을 일으키게 하는 것을 사건이라고 하고, 그 사건을 유발하는 존재가 변별체다. 고전역학적인 대상이라고 하더라도 변별체가 필요하다. 나무 토막이 운동하고 있는데, 만일 아무 변별체가 없다고 가령 빛도 없다고 생각해보자. 빛을 우리가 너무 특별하게 생각하는데 빛도 일종의 넓은 의미의 변별체다. 빛도 없다고 우선 생각해보면, 나무 토막이 거시적으로 가고 있지만 빛이 없다면 어떻게 알 수가 있나? 알 수가 없다.
- 나무 토막이 있다는 것을 알 수 있게 해주는 변별체가 있고, 그 변별체와 내가 정보적인 연관을 가질 수가 있어야 한다. 정보적인 연관을 가지고 있는 것들이 좍 있으면, 내 손가락으로 만져보면 안다? 이건 제일 쉬운 얘기다. 만져보는 것이란, 탁자에서부터 내 손을 통해서 감각이 뇌로 연결이 되는 것이고 이것이 정보다. 이런 것은 물리학에서는 다루지 않는다.
- 다시 말하면 대상이 있는 것을 알게 해주는 것이 변별체라는 것이다. 변별체는 양자역학적인 대상을 변별하는 것이 지금 우리 여기서는 상당히 중요한 것이지만, 고전역학적인 대상도 변별체를 통해서 결국은 아는 것이다. 그러니까 고전역학이나 양자역학이나 변별체 문제에서는 아무런 차이가 없다.

- 결국 변별체를 통해서만 대상을 아는 것인데, 그런데 차이는 고전역학에서는 어떤 대상이 '여기 있다'고 한다면 그것이 어딘가에 '있다'는 것을 전제로 해서 찾아가면서 보는 것이다. 그러니까 어딘가에 있다 혹은 없다 두 가지 상태만 있는 것이 고전역학이다.

2. 상태함수, 성향, 확률

- 양자역학에서 상태는 '성향'이라는 것으로 나타낸다. 변별체를 통해서, 대상이 있다는 결과가 나올 확률과 없다는 것이 나올 확률이 있다. 있다는 것이 나올 확률이 a라면, 없다고 나올 확률은 1-a를 하면 된다. 그런 확률로 된다는 것이 '성향'을 가진다는 뜻이다.
- 일단 확인이 됐다고 한다면, 그 의미가 대상이 거기에 있다는 것이 확인이 됐다는 뜻이냐,하고 어떤 학생이 질문했던데 그건 잘못 이해한 것이다. 사건을 일으켰을 뿐이지, 거기에 있다는 의미가 아니다. 왜냐? 확인이 됐다는 것은, 그 대상이 있거나 없다는 뜻이 아니다. 대상이 그 장소를 점유하는 것이 아니다. 그 위치의 성향만을 얘기했을 뿐이다.
- 어떤 위치에서 확인이 됐다고 할 경우는, 그 순간의 성향이 1이라는 뜻이다. 성향이 1이지, 대상이 그 위치에 있다는 의미는 아니다. 있다 혹은 없다는 그 위치에서 대상의 성향이 가질 수 있는 성격이 아니다. 성향이 1로 나왔다고 해도, 변별체와 만나고 나면 다시 성향이 바뀐다. 슈뢰딩거 방정식은 시간에 따라서 성향이 어떻게 바뀌는가를 얘기해주는데, 당연히 성향이 계속 1로 있는 것이 아니라 바뀐다.
- 바뀌고 나서 다른 변별체를 만나면 또 역시 성향 값을 가지게 되고, Yes나 No(1 또는 0)가 나올 수 있다. 앞서 Yes가 나왔다고 해서 계속 Yes만 나올 이유가 없다. 변별체는 그저 눈에 보이는 거시적인 것이 아니라 그것의 기능적인 측면이 중요하다.
- 흔히 잘못 이해하는 것이, 한 위치에서 대상이 변별체에 의해서 확인이 됐다고 해서 그 대상이 그 위치에 있다고 생각하는 것이다. 이 생각이 벌써 고전역학적인 것이고, 이 생각을 수정해야 한다. 있다 혹은 없다, 어떤 운동량을 가졌다 혹은 안 가졌다, 이런 (고전역학적) 개념을 사건을 일으킬 성향으로 바꿔 생각해야 한다. 구체적으로는 확률이 되겠지만, 어떤 운동량의 값에 해당하는 사건을 일으킬 성향, 이런 것이 양자역학적인 상태이다.

- 성향은 상태함수의 성격을 말하고, 확률은 성향의 절대값의 제곱으로 나타난다. 확률은 구체적인 수치로 나오고, 성향은 함수이다. 왜 함수 형태냐? 서로 다른 두 갈래로 가다가 만날 때 어떤 식으로 만나냐, 이런 것은 함수 성격에 의해서 나오기 때문이다.
- 예를 들어서 다른 모든 것은 다 없어지고 두 갈래만 남았다고 해보자. 즉, 여러 갈래로 가다가 남은 두 갈래 외의 다른 위치에서는 모두 공사건을 일으키고 검출이 안 되는 경우이다. 그러면 상태가, 그 두 갈래만 남았다는 뜻이다. 그 남은 두 갈래가 가다가 스크린 어느 지점에 표시가 나타날 것이냐, 그 두 갈래가 스크린이 있는 지점에서 어떻게 만날 것이냐? 그때 만나는 것은 확률로 만나는 게 아니라 성향으로 만난다. 확률이 하나는 5이고 하나는 3이라고 해서 둘이 합해서 8이 된다, 그런 식으로 만나는 게 아니다. 두 갈래 각각의 수학적인 상태함수의 결합으로 만난다.

3. 점유 개념 vs 성향 개념

- 상태함수는 파동적인 성격을 가진다. 대상이 파동이라는 말이 아니다. 그렇게 파동이 겹쳐서 증폭도 되고 상쇄도 되는 것이다. 그러한 수학적인 표현을 추상화해서 성향이라고 내가 불렀다. 그러면 거기서 실제로 몇 퍼센트로 관측이 될 거냐,하는 것은 확률로 나온다. 성향을 알면 거기서부터 확률을 계산할 수가 있다. 그렇게 개념을 구분해야 한다.
- 그래서 사건을 일으켰다고 해야 옳다. 관측이 됐다는 말도 고전적인 이야기이다. 고전적이라 함은, 어디엔가 있을 거다 그런데 여기에 있었다,처럼 '있다'는 것을 전제로 했을 때 관측이라는 말이 나온다. (그런데 양자역학적으로는) 관측이라기보다는 그 위치에서 사건을 일으켰다고 해야 한다. 그리고 대상은 사건을 일으킬 수 있나 없나하는 것(사건 야기 성향)을 가지고 있는 것이다.
- 이렇게 관념의 틀을 바꾸고 확장해야 한다. 어떤 위치에 어떤 운동량을 가진다하는 점유 개념을 더 확장해야 한다. 사실은 점유 개념을 버리고, 성향 개념으로 가야 한다. 점유 개념은 어떤 위치에서 1, 나머지는 다 0이 되면서 나아간다는 것이고, 성향 개념은 그 순간에 어떤 위치에서의 성향이 1이었더라도 (그 다음에는 달라지면서) 계속 퍼져서 나가는 것이다. 어느 위치에서 성향이 1이 나왔다고 하더라도 그 성향을 가졌다하는 말은 쓸 수가 없다.
- 사물을 보는 관점을 이렇게 확장해야 한다. 대상이 어떤 위치를 점유하고 어떤 운동량을 가진다, 하는 그 개념이 너무도 강하게 우리한테 박혀 있다. 그리고 관측을 한다고 하면, 그 위치와 운동량을 확인하는 것이다,하고 지금도 대부분 그렇게 생각을 하는데 그것을 수정해야 한다. 그런 점

유 개념이 아니다. 사건을 일으키는 것이고 사건을 통해서 우리는 정보를 얻고 정보를 통해서 상태를 다시 확인해서 다음에 일어날 사건을 예측하는 것 뿐이다.

- 대상 자체는 입자도 아니고 파동도 아닐 뿐만 아니라, 그 대상의 상태가 성향을 나타내는, 말하자면 '사건 야기 성향'을 가지는 것 뿐이다. 이렇게 정리해야 한다. 그런데 지금도 많은 학자들도 그렇고 문헌을 보면, 관측을 하면 어디에 있는지 확인이 되고 입자이다, 관측을 하기 전에는 뭔지 모른다고 한다. '있다'가 아니라 그 위치에서 그 순간의 성향이 1이었다라고 해야 한다.
- 여전히 있다, 없다를 못 버리고 있다. '관측 전에는 없다고 하더라도 관측하면 있다는 것이 확인이 된다, 관측함으로써 있는 것이 된다', 이런 말은 틀린 말이다. '관측함으로써 그 성향이 그 순간에 1임을 확인했다',고 해야 맞다. 그리고 그 다음에는 그 순간에 1인 상태가 다시 슈뢰딩거 방정식에 의해서 성향이 1이 아닌 일반적인 것으로 또 바뀐다, 이렇게 되는 것이다.

4. 고전역학적 바탕 관념과 양자역학적 바탕 관념

<최> 그러면 바탕 관념에 시공간 개념이 있듯이 점유라고 하는 것도 바탕 관념 중의 하나이고, 자득적으로 생긴 중요한 개념으로서 바탕 관념의 하나라고 할 수 있을까?

- 그렇다. 우리를 아주 강하게 지배하고 있는 바탕 관념이다. 어디에 있고, 어떤 운동을 하고 있다, 하는 바탕 관념. 고전역학이 바로 이것을 전제로 해서 나왔는데, 그것을 수정을 해야 되는 것이다. 그 바탕 관념을 버리라는 것이 아니라, 성향의 특별한 경우가 고전역학이 되는 것이다. 특별한 경우라는 것은 나머지 경우에는 다 0이고 어느 한 위치에만 계속 1인, 이것도 하나의 성향일 수가 있는 것이다.
- 그런데 이런 특별한 경우는 양자역학적인 세계에서는 안 나타나고 고전역학에서는 근사적으로 그렇게 되는 것이다. 그러니까 거시적인 대상은 근사적으로 고전역학적인 결과를 나타내게 되니까, 고전역학적 개념 자체를 절대화시키게 된 것이다. 그런데 실제로는 고전역학적 개념을 완화시키고 일반화시켜야 한다.

5. 푸리에 변환 : 시간-공간 & 운동량-에너지

- (고전역학적 바탕 관념과 양자역학적 바탕 관념의 차이를 만드는 것으로 점유와 성향 개념이 있고,) 또 한 가지는 운동량과 위치의 관계이다. 운동량이라고 하는 것은 독립된 것이 아니다. 위치의 성향을 알면 그것의 푸리에 변환이 보여주는 성향이 바로 운동량 성향이다. 수학적으로 푸리에 변환으로부터 나온다.
- 그런데 푸리에 변환의 기본적인 성격은 무엇이냐? 위치의 성향을 확률로 환산했을 때 한 군데에서만 거의 1이고 나머지 다른 데에서는 다 0인 특별한 경우가 있을 수 있다. 그것의 푸리에 변환은 어느 한쪽 공간에서 거의 모든 것의 확률이 1이 되는 것과 연관이 된다(?). 특별한 한 점이 아니라 널리 퍼져서 성향이 여러 군데에서 거의 비슷하게 되면, 다른 쪽에서는 어느 한 군데가 높고 나머지가 낮은 이런 수학적인 관계가 되는데, 이것이 푸리에 변환의 기본적인 특성이다.
- 이것이 바로 불확정성 원리다. 위치가 근사적이나마 상당히 정확하게 나타나는 성향을 가졌으면, 그것의 운동량의 성향은 여러가지로 퍼져서 어떤 것이든지 거의 비슷하게 전체 공간에 퍼진다는 것이다. 위치를 정확하게 알면 운동량을 잴 수 없다, 운동량을 정확하게 재면 위치를 정확하게 알 수 없다, 불확정성 원리를 흔히 이렇게 말한다. 각각이 독립적인 것이 아니라 바로 그 위치와 운동량 두 공간이 푸리에 변환 관계로 연결되어 있는 그런 구조를 가졌다, 시간 공간의 구조가 그러하다,는 의미이다.
- 과거에는 시간과 공간, 운동량과 에너지가 완전히 다른 것인 줄 알았는데, 이 두 공간이 이렇게 푸리에 변환을 통해서 서로 연결이 되어 있다,하는 것을 우리가 알게 된 것이다. 말하자면 상대성이론에서 공간 3차원, 시간 1차원으로 독립적으로 봤는데 합쳐서 4차원이 되더라,하는 것과 마찬가지다. 시간, 공간 4차원이 에너지, 운동량 4차원과 푸리에 변환 관계로 연결된다는 것을 인정하면 그냥 그것 자체가 불확정성 원리이다. 불확정성 원리는 따로 가정하거나 어디서 따로 나오는 것이 아니다.
- 그리고 양자역학의 구체적인 수학적인 표현을 보면, 교환자(commutator)라고 해서... 운동량과 위치의 연산자(operator) 순서가 바뀌면 부호가 반대가 되는, 이런 가정을 해야 한다. 그런데 그게 필요가 없어진다. 저절로 시간 공간과 운동량 공간이 이중적인 통합된 4차원이다,하는 가정이 있으면 거기서부터 다 나온다. 양자역학의 복잡한 다른 가설이 필요 없어진다. 내가 얘기한 네 가지 가설 안에 그 내용은 안 들어있다. 소위 교환자라는 것이 안 들어있다. 그러면 그게 어

디에 있느냐? 바로 둘이(시간 공간과 운동량 공간이) 푸리에 공간으로 연결이 된다는 것으로 해결된다.

- 자연의 공간이라고 하는 것이 그렇게 제멋대로 따로따로 노는 것이 아니라 서로 연결되는 구조를 가졌다,는 것을 파악하면 양자역학의 수학적인 표현들은 아주 자연스럽게 나오게 된다. 그래서 그것을 공리적으로 표현한 것이 책에 써놓은 네 가지 공리이다. 그 네 가지 공리를 각각 하나씩 보면 뭐 이상한 게 하나도 없다. 굉장히 자연스러운데, 그것만 인정하면 나머지 양자역학 속에 나오는 복잡한 가설 등등 굉장히 어려운 도출, 이런 것들이 거의 다 필요없게 된다. 그래서 그 중의 제일 깔끔하게 설명한 것이 이중슬릿 실험이고, 조금 전에 얘기했지만 삼중슬릿으로 확장해보면 그 의미가 더 명확해진다.

6. 광전효과

<학생질문> 광전효과는 금속 등의 물질이 빛에 쪼이면 전자를 내놓는 현상이다. 전자는 일정 진동수 이상의 빛을 비추었을 때 광자와 충돌하면서 금속으로부터 튀어나오게 되는데, 계속해서 빛을 쪼이면 금속에 있는 모든 전자가 튀어나오게 되는 것일까?

- 금속에 빛을 쪼여주면 전자가 튀어나오는데 오랫동안 하면 모든 전자가 튀어나오느냐하는 질문인데, 당연히 그렇다. 그런데 모든 전자라는 것이... 여기서 한 가지 유의할 것은, 고체물리학의 경우에는 금속 내에 있는 전자들이 대단히 많은데 그 많은 전자들은 각 금속의 원자 핵 주변에 둘러싸여 있다. 여기서 밖으로 튀어나오는 것은 제일 마지막에 놓여있는 것이고, 제일 느슨하게 연결되어 있는 것들이다. 이론적으로는 그것들이 다 튀어나올 수 있다. 그리고 그 안으로 들어가면 이번에는 에너지 갭(gap)이 훨씬 더 커야하기 때문에 훨씬 더 센 x선 같은 것을 쏘면 더 안쪽의 전자가 튀어나올 수 있다.

<최> 빛을 쬐서 광전효과가 일어나는 것과, 이온이 되는 것은 서로 다른 것인가?

- 마찬가지다. 분자에 쪼였을 때 그 분자에서 전자가 하나 튀어나가면 그 분자는 양의 이온이 된다.

<황> 튀어나간 전자는 어디로 가는 건가?

- 뭐 주변에 갈 수도 있고. 주위에 아무것도 없으면 돌아다닐 수 있을 것이고, 다른 물질에 가서 가서... 액체 속에서는 음의 이온을 만들 수도 있을 것이고. 전자는 가볍기 때문에 음이온은 쉽게 왔다갔다 한다. 양이온은 조금 더 무거워서 덜 움직이고 그렇다.

<최> 그러면 원리적으로 아주 강하게 빛을 쪼여서 전자가 하나도 없이 핵만 남게 되는 경우도 있을 수 있을까?

- 있을 수 있다. x선을 쪼여주면 물질의 안쪽 더 깊은 곳에 있는 전자가 튀어나올 수 있다. 그러면 x선 자체는 어디서 나오느냐? 전자가 제자리를 벗어났다가 다시 되돌아가려고 할 때 그 에너지 차이가 x선으로 나온다. 서로 그런 관계가 있다.
- 광전효과나 x선이나 기본적으로 같다. 광전효과는 대개 자외선 정도의 빛을 보통의 금속 표면에 쪼였을 때 일어나는 현상이고, 좀 더 깊은 곳에 위치한 전자를 튀어나오게 하려면 x선이나 감마선 같은 것을 쪼여줘야 한다.

7. 빛의 세기와 에너지는 어떻게 다른가?

<황> 좀 기본적인 질문같은데 제가 예전에 못 여쭤본 내용이다. 4장 양자역학 앞쪽에 광전효과 부분에서 빛의 세기 얘기가 나온다. 빛의 세기를 아무리 늘려도 진동수가 얼마 이상 되지 않을 때는 전자가 방출되지 않는다고 되어 있는데, 여기서 빛의 세기와 에너지가 어떻게 다른지 잘 모르겠다.

- 빛의 세기라고 하는 것은 하나하나의 빛이 가진 에너지다. 광자라고 하는, 하나하나의 빛이 가지고 있는 에너지가 곧 에너지라고 얘기했다. 빛의 세기는 거기에다가 몇 개의 빛이 들어가느냐를 합치면 전체 에너지가 나온다. 100개의 빛을 쪼였으면 그러면 100이라고 하는 세기로...

<황> 광자라고 보면 광자 100개를 ...

- 100개를 쏘면 하나를 쏠 때보다 세기가 100배가 된다. 에너지 값은 100배가 되는데, 전자는 하나도 안 튀어나온다. 왜냐하면 하나하나가 가진 에너지가 너무 작기 때문이다. 그런데 전자 하나가 튀어 나오려면 최소한도로 필요한 에너지 크기가 있는데 그 이하의 에너지를 가지는 광자로는 100개를 쏘아도 전자 하나가 못 나온다.
- 그런데 그 튀어나오게 하는 에너지로 치면 그 에너지의 100배는 아니더라도 40배, 50배 되는 에너지를 쪼여주어야 하는데, 그 에너지를 구성하고 있는 광자 하나하나의 에너지가 전자 하나를 튀어올릴 만한 게 안 되니까 전자가 안 나온다. 이것은 진동수와 관계가 된다, 파장이 얼마짜리냐 하는 것은 광자 하나가 가지는 에너지가 얼마냐하는 것에 해당하는데, 그런 광자 1000개를 쪼이더라도 아무리 쪼여봤자 전자 하나가 못 나온다.
- 그런데 그 에너지 이상 되는 것을 쪼여주면 하나만 해도 전자 하나가 나올 수 있고, 100개를 쪼이면 전자 100개가 나오는 것이다.

<황> 광자 하나의 에너지는 무엇으로 표현이 되나?

- 그것이 광의 파장 또는 진동수, 파수 이렇게 표현한다. 파동으로 빛의 상태를 얘기하면, 단위 시간에 몇 번 오르락내리락 하느냐, 그것이 그 광자가 가지는 에너지다.

<황> 광자의 에너지라는 것은 진동수로 말할 수 있고, 빛의 세기라는 것은 광자의 양이라고 보면 될까?

- 빛 전체의 양에 광자 하나하나의 에너지를 곱한 것이 빛의 세기다. 빛의 세기라는 것은 에너지니까, 쪼여주는 빛 전체에 들어가는 모든 광자의 에너지를 다 합한 것이 빛의 세기다. 광자의 숫자만이 아니라.

<황> 빛의 세기를 아무리 늘려도 안 튀어나오는...

- 그러니까 하나의 광자가 금속 표면에서 전자를 튀어나오게 할 수 없는 정도의 에너지를 가지고 있다고 한다면 그 광자를 100만 개를 쪼여도 전자가 하나도 튀어나오게 못 한다는 것이다.

<황> 중요한 것은 광자 하나의 에너지인가?

- 그것이 전자 하나(의 에너지 상태)를 올릴 수 있다. 그러니까 100개가 있어도 소용이 없다, 에너지 크기가 같은 것이라면.

<황> 하나라도 진동수가 큰 것이어야 전자가 튀어나온다...

- 그렇다. 그것이 광전효과의 핵심적인 얘기다. 세기도 에너지인데, 그 에너지는 전체의, 단위 면적이라고 한다면 그 단위 면적에 집어넣은 전체 빛의 에너지, 그것은 빛의 숫자에 광자 하나하나의 에너지를 곱한 것이다. 그것이 아무리 커봤자 소용이 없다. 하나하나의 에너지가 전자 하나를 탈출하게 하는 에너지 갭을 넘을 수 없다면.

<황> 그러면 앞에서 빛의 세기의 에너지 단위와 전자를 튀어나오게 하는 에너지의 단위는 같은가?

- 단위는 같다. 그런데 양, 총량을 세기라고 한다. 하나의 에너지 그것이 핵심적으로 중요한 것인데 그것이 진동수에 해당하는 것이다. 그런데 왜 진동수냐? 시간의 푸리에 변환을 하면 진동수가 된다. 말하자면 시간의 푸리에 변환이 에너지라는 것이다. 그리고 공간의 푸리에 변환은 파장이다.

8. 양자역학은 어느 수준까지 적용할 수 있는가?

<학생 질문> 주변에 먼지가 많으면 고전역학적으로 움직인다고 말씀하셨다. 그렇다면 이론적으로 공기는 있지만 먼지는 아예 없는 공간을 가정한다면 어느 정도 크기의 입자까지 양자역학을 적용시킬 수 있을까?

<최> 이런 질문도 많이들 할 법한 질문이다. 대상체의 크기라고 해야할까, 어떤 경우에 양자역학을 주로 이용하고...

- 공기라고 하는 것이 좀 까다로운 개념이다. 다시 말하면 어느 정도 크기의 것이 변별체 노릇을 할 수 있고, 어느 정도 이하의 것을 만나면 한 묶음으로 돼서 대상과 그냥 하나의 상태로 포함될 수 있는가, 이런 문제다. 보통의 공기는 변별체 노릇을 잘 못 할 것이다. 특별히 무거운 공기(입자)가 있어서 만나면 튄다든가 이렇게 되면 그 차이로 할 수가 있을텐데.
- 여기서 우리가 분명히 개념적으로 나누어야 할 것은, 어떤 것을 만나면 합쳐서 하나의 체계로 묶여져 버리고, 어떤 것을 만나면 변별체에 영향을 미치고 다른 것으로 가느냐. 영향을 미칠 수 있으면 변별체이고, 영향을 미치지 못 하면 변별체가 아니고 대상과 만나서 그냥 같이 가는 것이다. 대개 이렇게 된다.
- 여기 이 질문에서는 좀 애매한데, 실험 할 때에는 그런 먼지라든가 그런 것을 최대한으로 제거를 해야 양자역학적인 효과를 확인할 수 있다. 먼지같은 것이 있으면 양자역학적인 효과가 안 나온다. 왜냐하면 먼지들이 변별체 역할을 해서 다른 상태로 가버리니까. 그래서 거의 진공 상태로 해놓고 실험을 해야 한다.

<최> 그러면 양자역학을 고체라든가 이런 데에 응용을 한다는 것은, 거기에 대상이 되는 것의 상태함수를 파악하고 현재 상태 혹은 어떤 조건에서의 상태를 파악해서 어떻게 될 것이라는 것을 예측할 수 있게 되는 것이라고 할 텐데. 그러면 반도체라든가 이런 큼직한 것을 이루고 있는 대상을, 실험실 상황에서 하나의 작은 것을 놓고 파악을 한 다음에 그것을 큰 것에 적용한다든가 이렇게 되는 것인가?

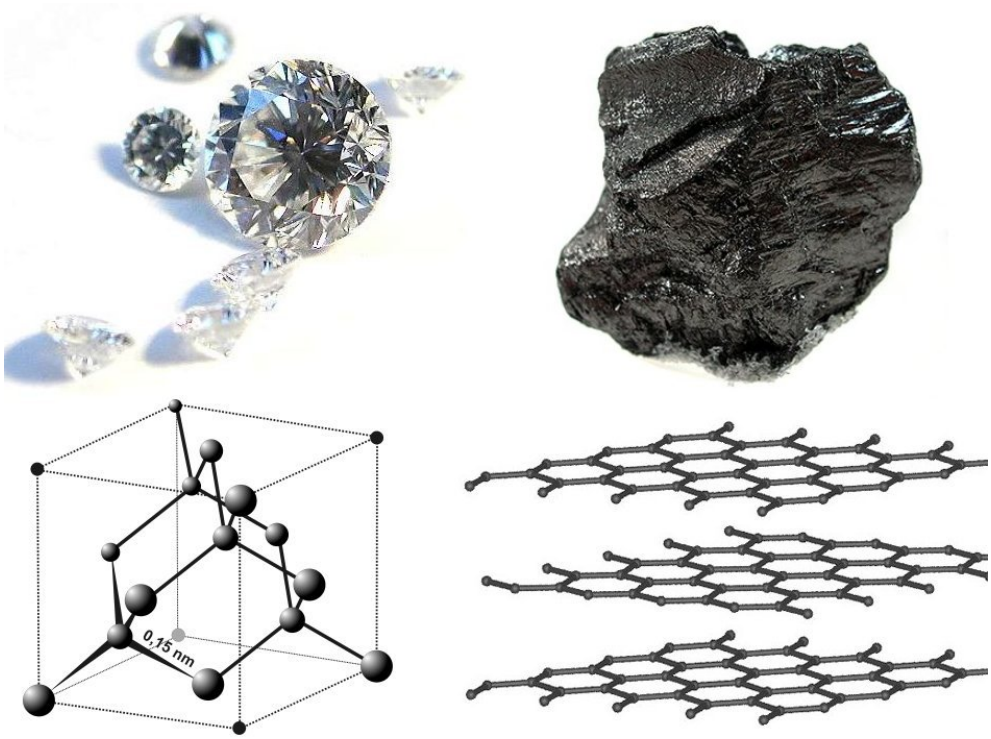
- 지금 여기서는 이론을 간단하기 위해서 기본적인 알맹이 하나가 있는 대상만 주로 생각을 했다. 알맹이 둘이 있는 것은 둘을 묶어서 그것이 하나의 대상의 상태가 되는 것이다, 분자처럼. 예를 들어서 두 원자로 이루어진 대상이라고 해보자. 산소 원자 두 개로 이루어진 산소 분자 O_2도 하나의 대상이다. 그리고 산소 분자 O_2의 상태는 산소 원자 O가 하나씩 떨어져있던 것과 다른 성격을 가진다. O_2 산소 분자는 우리가 호흡해도 안전하지만, 원자 단위로 된 산소 O는 마시면 큰일난다, 금방 화학결합을 하기 때문에.

- 이런 차이가 어디서 오느냐 하면, 양자역학적인 상태가 달라지기 때문이다. 산소 원자 둘이 만나면 이번에는 그 둘로 구성된 것의 상태함수가 나온다. 그것도 또 물론 변별체를 만나면 상태함수가 달라지기도 하고 여러가지가 있겠지만.

9. 양자역학과 다이아몬드, 반도체(실리콘)

- 그러면 반도체의 경우에, 반도체 전체를 구성하고 있는 원자 핵, 전자 들이 굉장히 많은데 그것들이 하나의 양자역학적인 상태를 이룬다. 그런 것도 다 계산을 할 수 있다. 주기율표에 있는 원소들 각각의 전자들이 가지는 상태가 다 다를텐데, 그 전자들의 상태를 다 계산해서 원자의 성질을 알 수 있다.
- 그런데, 고체 물리는 무엇을 하느냐? 금속 또는 반도체 또는 다이아몬드 이런 것들을 하나로 보고 그 안에 있는 전자의 상태가 어떻게 되느냐,를 계산해서 그것이 어떤 성질을 가지느냐를 얘기해주는 것이 고체물리학이다.
- 예를 들어서 다이아몬드를 보자. 금속과 다이아몬드의 성격이 반대다. 금속은 전도체, 전기를 잘 통한다. 다이아몬드는 전기가 안 통하는 절연체다. 다이아몬드일 경우에는 탄소가 다이아몬드 구조라는 특별한 구조가 있다. 소위 계급장(◇)이 다이아몬드 구조가 아니라. 그 다이아몬드 안에 있는 탄소 원자가 배열하는 복잡한 방법이 있는데 이게 다이아몬드 구조다. 그런 다이아몬드 구조를 가지게 되면 탄소 원자들이 아주 단단하게 엮인다. 비교적 좁은 공간 안에, 아주 촘촘한 건 아니지만 여러 개가 들어간다.
- 그때 다이아몬드가 단단하게 되도록 전자들의 상태가 구성이 된다. 그래서 있을 수 있는 가능한 상태 중에서 제일 낮은 에너지 상태에 있을 확률을 통계역학적으로 계산해야 되는데, 다이아몬드는 거의 늘 가장 낮은 상태에 있다. 반도체도 그렇지만 절연체인 다이아몬드의 경우에는 전자가 가질 수 있는 모든 가장 낮은 상태는 이미 점유가 된 상태이다. 그 다음에 있을 수 있는 상태는 그 다음 높은 에너지 상태다. 그러니까 수소 원자도 마찬가지인데, 제일 바닥 상태에 전자가 있고 그 다음에 훨씬 더 높은 상태에 전자가 있고, 이런 식으로 다이아몬드의 경우에도 가장 낮은, 다 같은 것은 아니고 에너지 단계가 총총 있지만, 가장 낮은 데까지는 탄소 하나에 전자가 몇 개씩 있는데, 그것을 보면 숫자가 아주 딱 맞다. 말하자면 순수한 다이아몬드에서.

- 그 다음 에너지 단계에 전자가 있으려면, 그 에너지는 훨씬 더 높은 상태인데, 에너지 갭(gap)이 상당히 크다. 빛이 쪼일 때, 그 빛이 전자에 에너지를 줘서 전자를 그 다음 높은 에너지 상태로 올리는데, 이것은 그 에너지를 흡수당하는 것을 의미한다. 보통은 빛이 흡수당한다. 흡수당하면 이 다이아몬드가 빛을 잡아먹게 될텐데 ...(실제로는 흡수하지 않는다). 다이아몬드 한쪽에 빛을 비췄을 때 빛이 잡아먹힌다면 반대쪽으로 안 나올 것이다.



[그림] 다이아몬드와 흑연의 구조 비교 (출처: wikipedia)

- 그런데 가시광선의 광자 하나하나가 가지고 있는 에너지보다 다이아몬드의 경우에는 이 에너지 갭이 훨씬 더 크다. 그러면 여기에 있는 전자에 빛을 줘서 한 단계 더 높은 에너지 상태로 올릴 방법이 없는 것이다. 그러면 어떻게 되겠나? 프리패스, 그냥 통과한다. 그것을 우리는 다이아몬드가 투명하다고 하는 것이다. 빛이 통과하니까 다이아몬드가 투명해보이는 것이다. 만약에 빛을 흡수한다고 한다면 검겠지.
- 반면에 다이아몬드와 똑같은 구조인데 단지 그 안에 들어가 있는 원소 자리에 탄소(C)가 아니라 실리콘(Si)라고 하는 것이 들어갈 수 있다. 그것이 실리콘이다. 우리가 돈 버는 데 많이 나오는 실리콘. 실리콘 많이 얘기하는데 그게 바로 실리콘 Si가 탄소 C 자리에 들어간 다이아몬드 구조의 물질이다.

- 그런데 그 차이가 뭐냐? 실리콘은 그 에너지 갭이 작다. 그래서 가시광선을 쪼이면 빛을 다 잡아먹고 에너지 상태가 위로 올라가는 것이다. 그래서 별로 투명해보이지 않는다. 그런데 그 갭이 아주 크지도 않고 아주 작지도 않고 적당히 작아서, 일부 전자만 높은 에너지 상태로 올라가고 대부분의 전자는 못 올라가는 이런 성격을 실리콘이 가지게 된다.
- 보통 도체는 그 에너지 갭이 거의 없다. 에너지를 주면 어느 에너지든지 받아서 더 높은 에너지 상태로 다 간다. 도체에서는 높은 에너지 상태로 올라가는 전자들이 많아서, 전기장을 걸면 (들뜬) 전자들이 쉽게 움직인다. 그래서 도체의 양쪽에 전기가 걸리면 전류가 흐르는 것이다.
- 그런데 반도체는 그게 몇 개밖에 못 올라간다. 도체는 에너지 갭이 거의 없는데, 반도체는 에너지 갭이 꽤 있다. 에너지 갭 때문에 더 높은 에너지 상태로 올라가는 전자가 확률적으로 숫자가 적다. 그렇게 되면 더 높은 에너지 상태로 올라가 있는 전자 개수가 도체에 비해서 상대적으로 적다. 그래서 반도체에 전기를 걸면 전기가 조금밖에 못 흐르기 때문에 도체도 아니고 절연체도 아니게 된다. 그래서 반도체라고 하는 말이 나왔다. 절반짜리 도체라는 것이다.
- 이런 식으로 설명할 수 있다. 반도체 같은 큰 대상도 하나의 양자역학적인 상태로 생각하고, 그 양자역학적인 상태함수가 어떠냐에 따라서 그 물질의 성질을 계산해내는 것이다. 지금 얘기했지만 다이아몬드일 경우에는 에너지 갭이 높기 때문에 (그것을 에너지 밴드라고 하는데) 계산만 턱 해보면 갭이 높다는 것을 알 수 있고, 안 해봐도 빛은 그냥 통과할 것이고 전기를 걸어도 안 흐를 것이다하는 것을 미리 다 알 수 있다.
- 반도체는 전기가 조금 흐르겠구나, 이런 것도 다 알 수 있다. 그런 것을 이용해서 우리가 소위 IT의 여러 가지 기술을 많이 이용하고 있다. 도체는 구리니 철이니 하는 전류가 잘 흐르는 것을 이용해서 전선도 만들고 한다. 이런 여러가지를 이해해서 활용하는 것이 바로 양자역학을 실제 물질에 적용하는 사례다. 그런 분야가 고체물리학이라고 부르는 것이고, 요즘에는 응집물리학이라고도 한다. 여러가지로 활용이 될 수 있는 학문이다.

<최> 그러면 원칙적으로, 다분자라고 할까 그런 여러 입자로 구성된 모든 것들을 다 양자역학적인 상태가 어떤지 구할 수 있나?

- 그런데 실제로는 그렇게 하나로 딱 연결된 상태로 구할 수가 있는 것이 있고, 그 안에 듬성듬성 떨어진 것들은 그것을 하나의 연결된 양자역학적인 상태로 만들기 어려운 경우가 거의 대부분이다. 그래서 아주 순수하게 된 경우는 되지만. 사실은 결정체들은 굉장히 정교하게 제자리를 잡

고 있다. 그래서 그 성질을 이용해서 우리가 계산을 하는 것이지, 복잡하게 제멋대로 돼있으면 계산도 어렵거니와, 하나의 단일한 양자역학적인 상태를 구성하는 대상이 되기 어렵다. 그래서 다른 것과 만나면 이것이 서로간에 변별체 노릇을 해서 다른 상태로 점프들을 하는 것들이 그 안에서 서로 연결이 된다(?).

- 대부분의 것들은 여러가지 양자역학적인 상태로 계산할 수 있는 것들의 복합체, 혼합체 비슷하게 되어 있다. 그래서 자기네들끼리 계속 그 안에서 서로 변별을 시키면서 계속 점프 하는 것이다. 그러니까 그런 것들은 확률적으로 통계적으로밖에 쓸 수 없는 경우가 거의 대부분이라고 보면 된다.

10. 슈뢰딩거의 고양이

- 그래서 예를 들면 이런 얘기가 있다. 슈뢰딩거의 고양이, 심지어 사람, 이런 것도 다 양자역학적인 상태라고 얘기들 한다. 그렇다면 내가 변별체를 만나면 상태 전환을 할 것이고, 변별체를 내가 안 만났다면 내 양자역학적인 상태가 그대로일 것이다,는 얘기가 된다. 양자역학적인 상태는 많은 경우에 여러 개의 성분들로 결합이 될 수 있다.
- 이중슬릿이라고 한다면, 슬릿을 제외한 나머지 위치에서는 다 공사건이 일어나고 슬릿을 통과하는 둘만 남게 된다. 그러면 두 줄의 상태가 수학적으로 표시가 된다. 이 두 줄이 결합이 되는데, 이때는 그 두 줄이 플러스(+)가 되는 상태로 결합이 되는데, 이것을 중첩 원리라고도 부른다. 그런 수학적인 상태의 형식을 가진다.
- 사실 말이 안 되는 거지만, 슈뢰딩거의 고양이 예를 들어보자. 슈뢰딩거 고양이의 양자역학적 상태가, 무슨 이유로 나머지 모든 상태들은 전부 다 공사건이라서 있을 수 없는 상태이고, 그래서 지금 현재 이것이 가질 수 있는 유일하게 남은 공사건이 아닌 상태는 뭐냐, 살아있는 상태와 죽어있는 상태 둘만 남았다는 거지. 그러면 슈뢰딩거의 고양이의 양자역학적인 상태는 '살아있는 상태+죽어있는 상태'라는 것이다.
- 그런데 그 중에서, 예를 들어서 살아있다고 나오는 쪽에 변별체를 댔을 때 Yes, 즉 사건이 나타나면 고양이가 살아있는 것이고, No 즉 공사건이 나오면 고양이는 죽은 상태가 되는 것이다. 그러니까 그것을 판별하려면 두 가지 사건 중에 한 쪽에 변별체를 대느냐에 따라서 죽은 상태가 나올 수도 있고 산 상태가 나올 수도 있다, 그런 얘기가 된다.

- 그런데 아까도 얘기했지만 이것은 (논리적인 비약을 해서), 보면 이렇고 안 보면 저렇다는 식으로 얘기하는 것이다. 즉 안 보면 두 상태가 그대로 살아남아 있고 보면 어느 하나가 된다는 식으로, 즉 본다 안 본다는 것으로 우리가 점프를 해서 굉장히 신비스럽게 보는 것이다. 누가 보느냐 이런 식으로.
- 사실은 변별체를 갖다 대느냐 안 대느냐의 문제다. 변별체를 어느 쪽에 갖다 대면 그 중의 하나가 확인이 되거나 안 된다, 이런 것을 극대화시킨 사례가 지금 슈뢰딩거의 고양이 얘기라는 것이다. 그런데 거기서 우선 말이 안 되는 것이, 그 슈뢰딩거의 고양이를 구성하고 있는 상태는 여러가지 복잡다단한데, 어떻게 다른 것들이 다 공사건이 되고 죽은 상태와 살아이는 상태 두 가지만 남느냐, 이것은 완전히 비현실적인 상황으로 사례를 만든 것이다.
- 그 다음에 거기다가 변별체만 갖다 대면 되는데, 마치 내가 (고양이가 들어있는 상자의) 뚜껑을 열고 보면 살고 안 보면 산 것도 아니고 죽은 것도 아니다, 이렇게 확대 해석해서 문제로 삼는 것이다. 그런데 그렇게 가기 전에, 이미 고양이라고 하는 대상은 내부적으로 수없이 서로 간에 변별체가 돼서 여러가지 상태가 복합적으로 왔다갔다 하는 그런 통계역학적인 어떤 특수한 구조를 가진 몸이다. 그런데 그런 것을 다 무시하고 극단적으로 그것을 하나의 양자역학적인 단일 상태로 보는 것이 문제다. 또 그것이 수없이 많은 공기라든가 주변의 영향에 노출되어 있는데, 그런 것을 완전히 무시하고 있다.
- 그래서 슈뢰딩거의 고양이 얘기가 마치 어떤 실험 사실이다, 현상이 그렇다하고 얘기하는 것에는 엄청난 갭이 있다. 현실 세계에서는 훨씬 더 단순한 경우의 변별체와의 관계, 내가 이 책에 쓴 네 번째 공리 그것으로 나타나는 것 정도에 엄격히 국한해서 봐야 한다.

끝.

녹취: 황승미 (녹색아카데미)

* 알림: 본문의 슬라이드 자료는 녹색아카데미 웹사이트를 참고해주세요.
* 댓글이나 의견은 녹색아카데미 페이스북 그룹, 트위터, 인스타그램 등을 이용해주시면 감사하겠습니다. 녹색아카데미 웹사이트의 자연철학 세미나 게시판과 공부모임 게시판에서도 의견이나 질문을 남길 수 있습니다.