

수소원자의 미세구조 연구
Theoretical study of fine structure of hydrogen atom

KANG, Daehyeon
samplemoon@korea.kr
Jinangun, jeonlabukdo, Korea

Abstract

새로운 스핀-궤도 결합함수와 수정된 전기포텐셜을 사용하여 수소원자의 미세구조를 설명하였다. 많은 검증을 거쳐야 하지만 잘 될거라 믿는다.

The new spin-orbit coupling function and the modified electrical potential are used to describe the finestructure of hydrogen atoms. We need to go through more verification, but I think it will succeed

전자의 스핀-궤도 상호작용 이론

1. 서론

어떤 기본입자들은 고유의 자기모멘트를 가지고 있다. 입자 중에 전자가 대표적인 것이다. 전자는 $1/2$ 스핀을 가지고 있는데 상황에 따라 변하지 않는 특징을 갖는다.

원자의 선 스펙트럼에 의하면 전자 스핀과 궤도운동이 상호작용하여 에너지 준위에 변동을 일으키는 것으로 관찰이 된다.

여기서 문제는 원자 내에서 스핀을 가진 전자가 궤도운동을 할 경우 스핀과 궤도운동으로 인한 자기장이 상호작용하면서 보여주는 에너지 섭동항이 어떤 함수로 표현이 되는지를 정확하게 알지 못한다는 것이다.

보통, 원자핵과 전자사이의 거리 r 의 3승에 반비례하는 것으로 알려져 사용하고 있으나 단정하기는 어렵다. 실제 현상과 이론적 계산수치가 들어맞지를 않아서다. 전자가 궤도운동을 하면 궤도운동에 의한 자기장과 스핀에 의한 자기장이 상호작용하여 에너지가 결정이 될 것으로 예상이 되지만 전자스핀중심과 궤도 운동선이 일치하는 이유로 모호한 상황이다.

현재는 전자가 중심에 원자핵이 전자 주위를 공전한다는 상대적 운동개념으로 이해하고 있으나 엄밀하게 말해서 관측자인 우리는 전자가 원자핵 주위를 궤도운동하는 것으로 이해해야 정상이다.

원자 선스펙트럼으로 관찰되어지는 상황에서 전자스핀중심과 전자의 궤도선 위치가 일치하지만 스핀-궤도 결합에너지가 유한한 값인 것은 명백하다.

스핀-궤도 결합현상은 복잡해보이는데 이것이 상황에 따라 변하지 않는 것이라면 함수변환을 이용하여 단순하게 처리하는 방법도 난관을 통과하는 하나의 방법이 될 것이다.

2. 새로운 방법론

함수변환을 이용하여 상황을 개선해보자는 것이다.

실제 스핀-궤도 결합 함수가 $f(H,r)$ 라고 할때 상황에 따라 불변인 항과 변하는 항 두가지로 표시할 수 있다고 하면 아래와 같이 표시한다.

$$F(H,r) = f(h',r')g(h,r)$$

$f(h',r')$ 는 전자의 스핀의 중심과 궤도 선과의 불변 거리로 나타나는 불변함수이고, $g(h,r)$ 는 전자의 궤도운동에 따른 자기장 및 거리 함수이다.

전자의 질량중심은 공전궤도 선을 따라 운동하므로 스핀 중심축과 궤도 선과는 일치하므로 거리가 "제로"로서 변치않는 것으로 볼 수 있다.

이러한 상황에서 전자의 고유 자기모멘트와 궤도운동에 의한 자기장의 상호 작용으로 에너지 준위에 변동이 나타난다고 보는 것이다.

3. 구체적 해법

전자의 자기모멘트와 전자의 공전궤도운동에 의한 자기장과의 상호작용에 대한 에너지 섭동 함수는 이렇게 표시된다.

$$E = S \cdot B \quad (1)$$

(여기서 E 는 에너지, S 전자스핀(자기모멘트), B 궤도운동 자기장)

전자의 궤도운동에 의한 전류로 인하여 발생하는 자기장은 거리 r 에서

$$B = (2/C)(1/y) I \quad (2)$$

로 표시된다. 여기서, C는 광속, I 전류, y 전자와 운동궤도선과의 법선거리)

(2)식에서 사실상 y=0 인데 변화가 없다고 여겨진다.

I 는 전류인데, 원궤도일 때 $I = e(v/2\pi r)$ 놓을 수 있고 각운동량과 연관지어

$I = e(L/2\pi m r^2)$ 으로 표시가 된다.

결과적으로 (1)식은

$$E = (S \cdot L)(e/2\pi mc)(2/y)(1/r^2) \quad (3)$$

(여기서, L은 궤도 각운동량, e 전하량, m 전자질량, y=0, r 전자와 양성자 사이의 거리)

위의 (3)식과 같이 유도된다.

수소원자에서 전자의 궤도운동에 의한 자기장과 전자의 고유 자기모멘트의 상호 작용에 의해 발생하는 에너지 섭동항은 전자와 양성자의 거리에 제곱에 반비례 하는 형식으로 나타난다.

실험치와 비교해보면 $y = e^2/mc^2\alpha^2$ 이다. 여기서 α 는 좀머펠트 상수이다.

이 수치는 더 많은 검증을 거쳐야 한다.

4. 결론

이런 결과는 거시적 관점을 원자수준에 적용된다고 할 때 전자가 고유의 자기 모멘트와 공전궤도운동에 의한 자기장이 서로 작용하여 에너지 섭동항을 만든다고 보았을 때 도출되는 것이다.

원자 수준에서 (3)식의 (1/y) 부분이 정확히 어떤 내용인지 알 수는 없겠다.

다만, 우리는 실험치와 비교해서 (1/y) 값을 결정할 수 있을 따름이다.

이런 점이 미시세계를 다루는 양자역학의 난점이라고 본다. 수소원자 외에 다른 원소로는 사실상 검증하기가 어렵다는 것도 문제이다.

전자의 전기포텐셜 이론

⇒ 시작하는 말

전자의 내부에서 전하는 어떤 양상인가?

수소원자의 선스펙트럼의 미세구조를 설명하기 위해 상대성이론을 적용해서 에너지 준위를 연구해보면 실제와 맞지는 않다.

이 어긋남은 아주 명백하다. 예를들어 2s 궤도와 2P 궤도 사이의 에너지 준위 차가 실험과 비교했을때 4배이상 크게 계산값이 나온다. 그러면 상대성이론이 오류가 있을까?

그건 아니라고 본다. 수없이 많은 실험검증에서 살아남은 상대성이론이 여기서만 오류라고 보기는 난감하다. 그럼 이런 결과를 낳은 원인을 찾아야하는데 나는 명백하게 전자가 내부구조가 있기 때문이라고 여기고 있다.

전자와 양전자가 포지트로늄을 형성한 후 광자를 방출하고 소멸하는 현상은 잘 알려진 현상이다.

전자와 양전자는 단위 전하가 있어서 둘 사이에는 항상 포텐셜이 작동한다. 이 포텐셜은 전하량을 제공하고 둘사이의 거리로 나눈 형식이다. 즉, $1/r$ 형식의 포텐셜이다.

전자와 양전자가 만나서 소멸할 때 둘사이의 거리는 $r=0$ 이 될 것이므로 에너지가 무한대로 방출될 것 같지만 실제로는 전자와 양전자의 질량에 광속을 곱한 양만큼만 방출한다는 것이다. 이것이 난해한 문제가 되어 있다. 그렇다고 양자역학을 비롯해서 어디에서도 $r=0$ 이 될 수 없다는 근거도 없다.

수소원자의 선스펙트럼 미세구조를 설명하면서 2S 궤도와 2p궤도 사이의 에너지 준위 차이를 상대론적 효과와 다윈항이라는 것을 사용한다. 다윈항은 양자요동으로부터 유도하는데, 원자핵주위의 진공에서 불확정성원리가 허용하는 범위 안에서 가상 전자-양전자 쌍이 생성되었다가 소멸한다는 전제 하에 유도된다고 주장하는 에너지 항이다.

이 다윈항이 수소원자의 2S 궤도를 약간 위로 밀쳐서 실험과 일치한다는 주장이다. 물론 잘 들어맞는 것도 아니고, 논란의 대상이다.

양자요동을 기초로 하는 양자전기역학(QED)은 치명적인 문제점을 안고 있다. 무한대로 발산하는 항-가상광자가 가상의 전자-양전자 생성하고 소멸하는 과정을 포함하는 경우에 발생한다-을 유한한 값이라고 우겨야 된다는 부분이다. 또 전자가 가상광자를 방출했다가 다시 흡수하는 과정을 다루면 가상광자가 질량을 가진다고 해야 무한대가 유한 값을 갖는다. 이런 무한대 문제를 제거하기 위해 재규격화라하는데... 이상하게 그렇게해도 현상과 잘 들어맞는다고 하면서 수학적 논리는 파탄나는데도 애용하고 있다.

⇒ 최소길이 논란

20세기 초에 물리학계에 최소길이 개념이 필요하다고 논란이 있었던 것으로 보여진다. 에너지 발산 문제가 최소길이를 가정하여 해결하려는 수단으로 거론이 되었던 거 같으나 흐지부지되었던 거 같다. 이때 최소길이는 양성자의 크기정도인 10에 마이너스 15승미터 정도로 추정했던 거 같다.

⇒ 새로운 관점

우리는 흔히 전자의 질량중심과 전하의 중심위치가 같을 거라고 생각 하는 거 같다. 그렇게 추정하고 다루고 있다.

우리가 미적분을 물리학에서 사용하는 한은 점이라는 개념을 사용해야 하는데 질량중심과 전하점이란 용어를 당연하듯 쓰고 있고 성공적으로 이용되어왔다. 양성자나 전자와 같은 소립자를 점으로 취급하였는데 최근의 연구에 의하면 양성자는 쿼크3개로 이루어진 입자인데 여전히 수학적인 점으로 취급하고 있다.

이렇듯 물리학은 크기가 없는 점을 사용하고 있고 앞으로도 사용할 것인데, 그러면 전기포텐셜 $1/r$ 의 발산을 막으면서도 수소의 선 스펙트럼 해석에서 드러난 이론과 실험사이의 에너지 준위 불일치를 개선하는 방법을 찾아야 될 것이다.

다른 방법이 존재할지도 모르지만 나는 전자의 질량중심과 전하점이 일치하는데, $r=0$ 에서 전기포텐셜이 유한한 수치를 갖는다고 보는 것이

정답이라고 본다. 수소원자에서 전자가 양성자와 $r=0$ 에서 만나도 전기포텐셜이 무한대로 가지않는다는 뜻이고 무거운 원자의 전자가 원자핵과 $r=0$ 지점에서 만나더라도 전기포텐셜은 유한한 수치를 갖는다는 뜻이다. 수소핵인 양성자가 3개의 쿼크로 이루어져 있고 수소핵보다 무거운 원자핵도 크기를 가진 이유로 이런 설정은 양자요동보다 타당하며 최소한 QED의 재규격화 기법보다 훨씬 더 그럴듯하다.

원자핵과 전자사이의 전기포텐셜이 수정이 되는 이유로 인해 수소 원자의 미세구조에 약간의 변동을 초래하는 것이다.

예를들어 전자의 전기포텐셜을 $1/r$ 형태로 표시해왔지만 이제부터는 $1/(r+R)$ 형식으로 표시를 해야한다는 것이다. 여기서 R은 대충 양성자 나 전자크기 정도일 것으로 추정한다.

수소원자 선 스펙트럼의 미세구조도 이 포텐셜을 적용하여야 바르게 설명이 가능하다는 것이다.

이럴 경우, 수소원자의 총 역학적 에너지 $E = (1/2)mv^2 - e^2/(r+R)$ 인데, 이렇게 함으로서 수소원자의 선스펙트럼 미세구조 문제나 전자-양전자 쌍소멸이나 에너지 발산문제가 해결될 것으로 생각된다.

1900년대 초반에 닐스보어가 했던 수소원자의 선 스펙트럼 설명을 위한 작업을 다시 해보자.

$$E = (1/2)mv^2 - e^2/(r+R) \text{ ----- (1)}$$

$$mv^2/r = e^2/(r+R)^2 \text{ ----- (2)}$$

$$nh/2\pi = mvr \text{ -----(3)}$$

위에서 (1)식은 수소원자의 역학적 에너지를 표시한 것이다.

(2)식은 전자의 원심력과 전기력이 같다는 조건을 담고 있고,

(3)식은 수소원자에서 전자의 각운동량이 프랑크상수의 정수배라는 의미를 갖는다.

(1)(2)(3)식을 가지고 전개를 하고 R이 대략 양성자 크기정도라면

수소의 미세구조 크기정도(10의 마이너스 5승 전자볼트)가 에너지 준위의 변동을 가져온다.

슈뢰딩거방정식의 파동함수로 상대성이론에 의한 효과와 전자와 양자 사이의 전기포텐셜을 수정된 형태로 계산하여보면 이러하다.

$$E = \sqrt{(p^2 + m^2)c^4} - \frac{e^2}{r+R} \quad (4)$$

(4)식에서 $p \ll mc$, $R \ll r$ 조건에서 전개한다.

$$= mc^2 + \frac{1}{2m}p^2 - \frac{1}{2mc^2}(p^2/2m)^2 - \frac{e^2}{r} + \frac{Re^2}{r^2}$$

위의 식에서 에너지 섭동항만 추려내면 .

$$\text{섭동항 } \varepsilon = -\frac{1}{2mc^2}(p^2/2m)^2 + \frac{Re^2}{r^2} \quad (5)$$

(5)식으로 요약된다.

(5)식을 슈뢰딩거 방정식에서 얻어진 수소원자에 대한 파동함수로 기대치를 구하면 에너지 섭동항의 구체적인 내용을 얻을 수 있다.

2s,2p 궤도에서 램이동이 맞다는 전제하에

수소원자의 이중 빨간 선스펙트럼(3s → 2p)을 가지고 추산해보았을 때 대략 $R=e^2/2.5mc^2$ 가 된다.

이것은 더 많은 검증을 거쳐야 한다.

⇒ 마치며

이 내용을 이해하기 위해서 독자 여러분은 상당 수준의 공부가 되어 있어야 한다.

상대성이론적 효과가 수소원자 에너지 준위에 반영된다면 수소원자의 2s와 2p 궤도 사이에 준위차를 줄여주는 어떤 것이 있어야 한다.

필자는 소립자들이 어떤 크기를 갖고있어서 또는 애초부터 $r=0$ 에서 전기포텐셜이 유한값을 갖는다고 보았다.

이런 이유로 수소원자의 에너지 준위가 상대론적 효과가 상당부분 축소되어 나타난다고 보았다.