

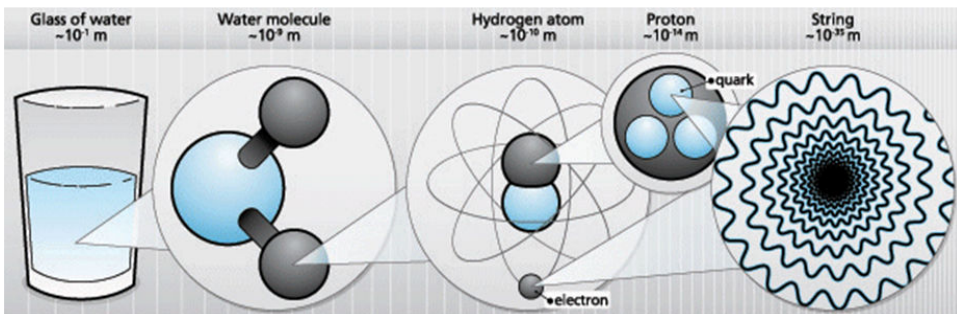
18

끝나지 않는 QM

우주의 모든 상수들이 지금과 같이 적절한 값으로 세팅될 확률은
페폼 창고에 태풍이 불어 닥쳐
보잉747 제트기가 자동으로 만들어질 확률과 비슷하다.
- 휴 로스 -

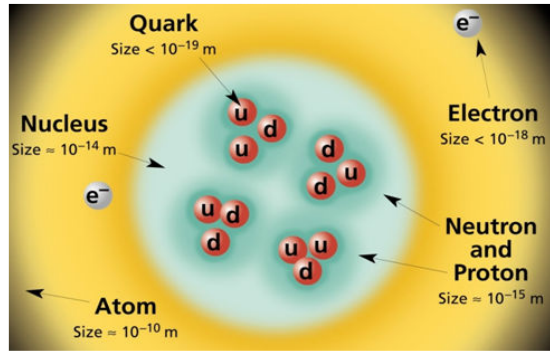
■ 원자 구성입자

보어의 원자모델을 통해 원자의 내부는 전자와 핵으로 구성되어 있음을 모델화 하였다. 또한 디랙의 예측과 앤더슨의 관찰로 반물질의 존재도 입증되었다. 더 강한 입자 가속기를 개발하여 원자핵 내부는 어떤 성분으로 이루어졌는지 관찰하고자 하였다.



|물질의 구성성분|

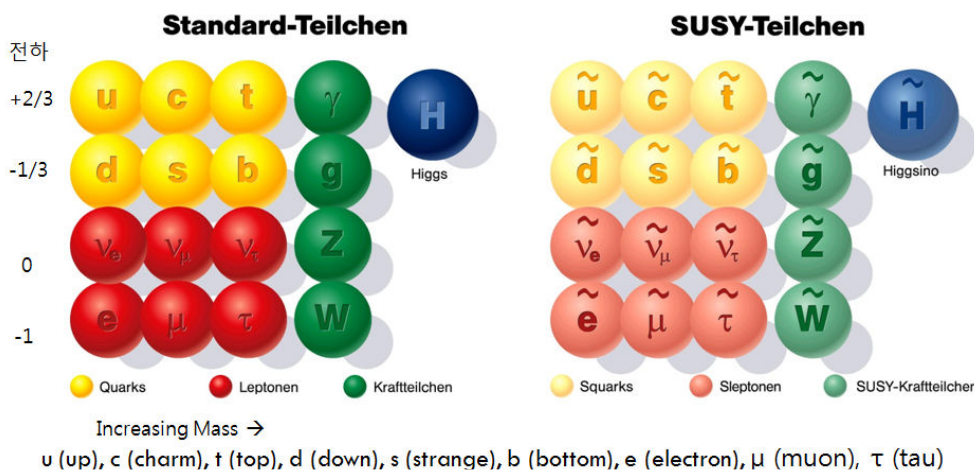
물질은 전자와 핵으로 이루어진 원자로 구성되어 있으며, 핵은 양성자와 중성자로 이루어져 있다. 중성자와 양성자는 3개의 쿼크(quark)로 이루어져 있으며, 업(up) 쿼크와 다운(down) 쿼크가 존재한다.



[원자의 구성 입자들]

다. $2/3$ 전하를 지닌 업 2개와 $-1/3$ 전하를 지닌 다운 1개가 모여서 전자와 전하량은 같으나 양의 값($q_e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = -q_p$)을 지니는 양성자가 된다. 중성자는 다운 2개와 업 1개를 지녀서 전하가 0가 된다. 원자의 크기는 10^{-10} m 정도이며, 전자는 10^{-18} m , 핵은 10^{-14} m , 중성자와 양성자는 10^{-15} m , 쿼크는 10^{-19} m 정도를 보인다. 질량은 양성자와 중성자 모두 $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 으로 전자의 2000 배정도 무겁다.

구성입자 중, u/c/t/d/s/b는 쿼크라고 하며, e/ μ / τ 와 이에 대응하는 중성미자(뉴트리노, neutrino)는 경입자(렙톤, lepton)로 약한 상호작용력을 지닌다. 이들 모두는 초대칭(super symmetric, SUSY)으로 반물질을 지닌다. 이들은 다시 1류(1st family) 성분인 e/ ν_e /u/d로 구분할 수 있는데, 이는 일정 형상을 지닌 모든 입자가 여기에 속한다고 할 수 있다. 2류(2nd family) μ/ν_μ /c/s와 3류(3rd family) τ/ν_τ /t/b는 빅뱅이후에 발생한 것으로 우주선이나 입자가속기에서만 관찰이 가능하다. 이들이 원자를 구성하는 전체 성분이 아닐 수 있으며, 더욱 강한 입자가속기를 이용하여 또다시 새로운 입자가 발견할 수도 있다.



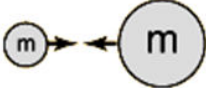
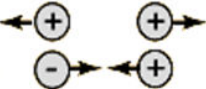

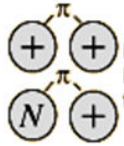
[현재까지 발견된 원자의 구성 성분들]

■ 4대 힘

자연을 구성하는 4대 힘으로, 중력, 약력, 강력, 전자기력이 있다. 이들은 자연상에 존재하는 모든 물질에 영향을 미치며, 중력과 전자기력은 원거리 힘으로 분리되며, 약력과 강력은 근거리힘이다. 이들중에 가장 약한힘이라고 생각되는 것이 약력이 아닐까하는 생각을 할 수 있다. 그러나 이외로 중력이 가장 작은 힘이 된다. 그 이유는 다른 모든 힘들이 중력장을 바탕으로 하는 계에서 작용하고 있고, 중력내에서 약력이 발생하므로 중력이 가장 작은 힘이 된다. 힘의 세기는 강력>전자기력>약력>중력의 순서가 된다.

4대 힘에는 서로에게 영향을 미치는 매개가 되는 입자가 존재한다. 가장 이해하기 쉬운 것은 전자기력을 작용시키는 광자가 있

다. 빛을 구성하는 입자로서 전자기력을 전달시키는 매개체가 된다. 전기, 자기력, 화학작용력은 모두 전자기력의 결과물이라고 할 수 있으며, 원자내에서는 쿼크와 전하를 지닌 렙톤이 광자의 작용력을 느끼게 된다. 약력은 중간 벡터 보손(intermediate vector boson)이 매개 입자로 작용하며, 전자기력과 동일하게 쿼크와 렙톤이 그 작용력을 느끼게 된다. 방사성 물질들의 일부들이 이러한 약력의 결과물이 된다. 글루온(gluon)은 쿼크사이에 작용하는 강력의 작동 매개체로, 핵 에너지의 폭발반응이 바로 강력의 결과물이 된다. 마지막으로 중력은 질량을 지닌 모든 물질에게 작용하는 힘으로 중력자(graviton)가 매개 입자가 된다. 그러나 이 입자의 존재 여부는 아직 확실치 않다.

<i>Gravity</i>		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	 neutrino interaction Induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z^0 , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Strong</i>	 Force which holds nucleus together	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)

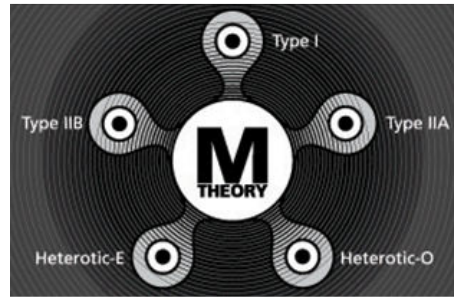
[자연에 존재하는 4대힘]

■ 통일장 이론

맥스웰에 의해서 전기력과 자기력이 하나로 통일되어 전자기력이 만들어진 뒤, 1915년 아인슈타인은 일반상대성이론을 이용하여 중력과 전자기력을 통일하려는 통일장이론(unified theory of field)을 만들기 위해 매진하였다. 그가 죽을 때까지 이론은 완성되지 않았다. 이러한 노력은 입자들 사이에 작용하는 4대 힘의 형태와 상호관계를 하나로 만들기 위해서 시도했었다.

1918년 바일(Hermann Weyl, 1885-1955)은 일반상대성이론과 전자기 현상을 통일 시키려고 시도하였다. 게이지변환(gauge transformation)으로 불리는 방법을 활용하여 다차원공간에서의 중력과 전자기력을 통일하였다. 아인슈타인은 바일의 연구를 부정하였으며, 스스로 통일장이론을 완성하고자 하였다. 1930년에 이르러서야 원자핵과 소립자 현상의 연구가 활발해지면서 자연계에 약력과 강력이 있음을 알게 된다. 계속해서 강력, 약력, 전자기력을 하나로 묶는 대통일장이론(grand unification theory)이 수학적으로 기술되었다. 이는 게이지 이론이라고 하며, 입자들이 일정 거리 이하로 가까워지면 세 힘이 하나의 힘으로 기술됨을 보였다. 그러나 3가지 힘간의 매개입자인 초대칭입자가 필요했으나, 현재까지는 발견되지 않았다. 현재까지는 전자기력, 약력, 강력이 양자화되므로 하나로 만들 수 있지만, 중력을 양자화시키는 것이 아직 성공하지 못하여 4대힘의 통일은 이루어지지 않고 있다. 사실 중력은 거시세계이며, 나머지 3가지 힘은 미시세계를 표현하는 데 적합하므로, 거시세계와 미시세계를 연결하는 고리를 찾지 않는 이상 힘의 통일은 이루기가 쉽지 않다.

최근에는 이 문제를 해결하고자 끈 이론(string theory)과 막 이론(membrane theory)가 등장하고 있다. 기본입자들을 끈의 진동이나 막으로 바라보는 것으로, 11차원 이상의 고차원에서 중력과 양자론을 결합하려는 만물의



[5가지 끈이론과 M이론]

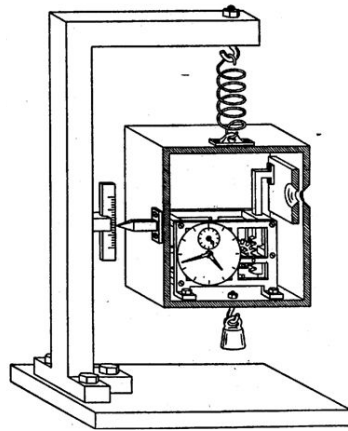
이론(TOE, theory of everything)을 만들고자 한다. 구성하는 끈은 10^{-33} cm로 작은 필라멘트와 같은 모양이라고 상상하고 있다. 초끈 이론은 5가지[Type I, Type IIA, Type IIB, E8×E8 hetero, SO(32) hetero]가 존재하며, 최대 26차원까지 정의하고 있다. 그러나 1995년 워튼(Edward Witten, 1951-)은 기존의 5가지 끈 이론은 사실 하나의 이론으로 서로 5가지 방향의 시각일 뿐이라고 생각하여, 11차원에 존재하는 하나의 이론(M이론)을 발표하여 끈이론을 재정립한다.

■ 발전하는 양자역학

입자의 정의가 새롭게 되고, 4대 힘의 존재를 느끼며 끈이론에 이르기까지 양자역학은 수많은 고비와 혁명적인 뛰어난 생각들로 인해 지속적으로 발전해 왔다. 물론 위대한 인물들의 주장이 늘 맞는 것은 아니었다. 아인슈타인의 경우, 하이젠베르크의 불확실성의 원리인 위치와 운동량을 동시에 측정할 수 없다는 것을 이해하려하지 않았다. 이에 빛의 상자라는 사고실험을 통해 불확실성의 원리가 성립되지 않

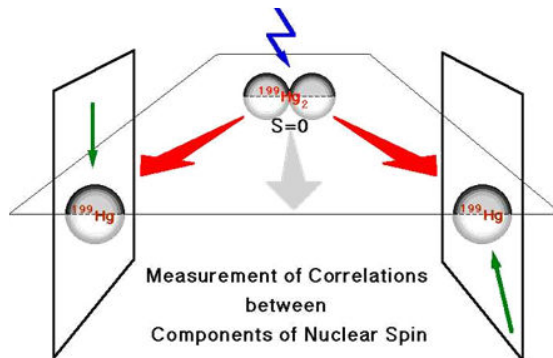
는 사례를 찾고자 하였다.

운동량과 위치량의 불확실성은 에너지와 시간에 관한 불확실성과 동일하게 해석할 수 있다. 장치는 특정시간(Δt)에 광자를 방출하고 나서 상자무게 변화를 측정할 수 있도록 구성하였다. 이때 무게의 변화로 에너지의 편차(ΔE)를 해석할 수 있다고 생각했다. 즉 $\Delta E \Delta t = 0$ 임을 보여서 불확실성이 성립되지 않을 것이라고 판단하였다. 그러나 이에 관해 보어는, 광자 방출시에 반동력이 발생하여 위치량이 변하게 된다고 지적하였다. 아인슈타인의 상대성 원리와 뉴턴의 작용-반작용 원리에 위배되는 실험이라고 지적하여, 아인슈타인의 첫 번째 도전은 실패한다.



불확실성 원리 위배 사례

두 번째 아인슈타인의 도전은 EPR 역설로 불리우는 국지성에 관한 사고실험이다. EPR은 아인슈타인, 포돌스키(Boris Podolsky, 1896-1966), 로젠(Nathan Rosen, 1909-1995)의 첫글자를 따온 것으로, 서로 붙어 있는 스핀을 무한히 멀리 떨어 트렸을 때 한쪽 스핀의 방향이 결정되면 다른쪽은 측정하지 않아도 자동으로 결정된다는 내용이다. 즉 슈뢰딩거의 고양이에 관한 사고실험을 반박하기 위해 제안한 것이다. 굉장히 멀리 떨어져 있다면 한쪽을



국지성에 관한 EPR 역설

결정하면 다른쪽은 빛보다 빠른 교신으로 원격 작용해야 한다는 것이 된다. 이는 두계가 어느시간 동안 서로에 대해 분리되어 있다면, 한계를 측정하는 행위가 다른 계에 실제적인 변화를 줄 수 없다는 것으로 해석된다. 즉 빛 보다 빠른 전달 수단이 없기에 슈뢰딩거의 원리를 반박하는 결과가 된다. 여기서 아인슈타인의 두 번째 반박이 성공하는 것처럼 보인다. 그러나 1982년 파리에서 비국지적 상황이 현실적으로 구현된다는 것이 증명된다. 즉 원거리 공간을 뛰어넘어 빛보다 빠른 교신에 의해 업스핀이 결정되면 반대쪽은 자동으로 다운스핀이 된다는 것을 실험적으로 증명했다.

이처럼 양자역학은 가시화시키기에 아직 무리가 있는 부분이 있고, 여전히 이론, 가설, 가정에 바탕을 두고 있다는 것을 명심해야 한다. 따라서 양자역학은 끊임없이 발전하는 학문으로 원자에서부터 우주의 현상을 이해하게 해주는 학문임은 명확하다. 양자역학을 제대로 이해하고 있는 사람은 지구상에 아무도 없다는 것을 확신한다는 파인만(Richard Feynman, 1918-1988)의 말처럼, 양자세계를 이해하기는 쉽지 않다. 그렇지만 어느정도 양자에 관한 개념을 갖고 세상을 바라본다면 많은 것들이 달라 보인다는 것을 느끼게 될 것이다.

■ 등장인물 살펴보기



바일(Hermann Weyl, 1885-1955)

독일의 수학자이다. 수학을 바탕으로 물리학적 자연현상을 해석하였다. 이론 물리학에 영향을 많이 미쳤으며, 21세기 수학사에 가장 영향력 있는 인물이기도 하였다. 시공간, 물질, 논리 등에 관한 수많은 책을 출판했으며, 일반상대성원리에 전자기력을 접목시키고자 노력하였다.



에드워드 위튼(Edward Witten, 1951-)

미국의 물리학자이다. 역사학을 전공하여 저널리스트로 활동하다가, 홀연히 물리학에 관심을 돌려 프린스턴 대학에서 박사를 받았다. 이론물리학의 최대 난점인 중력과 양자론 사이의 연결이론인 초끈이론의 최고 권위자로 꼽힌다. 이례적으로 수학계의 최고상인 필즈상을 수상했다.



보리스 포돌스키(Boris Podolsky, 1896-1966)

러시아의 물리학자이다. Caltech에서 박사를 하였으며, 아인슈타인에게 영향을 받았으며, 아인슈타인-로젠과 함께 EPR 역설을 주장하였다. 양자역학의 주요 논쟁거리가 되었고, 그는 특수상대성원리를 바탕으로 하는 전자기학에 관한 교재도 작성하였다.



나탄 로젠(Nathan Rosen, 1909-1995)

이스라엘의 물리학자이다. 프린스턴에서 아인슈타인의 조교가 되며, EPR 역설을 주장한다. 아인슈타인의 격려로 이스라엘에서 물리학에 관한 연구를 지속한다. 또한 일반상대성원리에서 아인슈타인-로젠 고리에 관한 공동 발견자이기도 하다.



리처드 파인만(Richard Feynman, 1918-1988)

미국의 물리학자이다. 양자전기역학(QED)의 재규격화로 1965년 노벨 물리학상을 받았다. 그는 기발한 사고와 행동으로 널리 알려져 있으며, 맨해튼 프로젝트의 일원으로도 활동하였다. 파인만 도표를 고안하여 양자역학을 개념적으로 이해하기 쉽도록 하였다.