

41. 표준모형

- ◆ 소립자의 수가 수백 개에 이르자 소립자를 분류하는 양자수로 아이소스핀의 z 축 성분인 I_z 와 초전하 Y 가 아주 유용하게 이용된다. 초전하란 무엇인가?
- ◆ 바리온과 메존 등 하드론을 아이소스핀의 z 축 성분과 초전하에 따라 늘어놓으면 정6각형 모양의 배열을 이룬다. 이것은 무엇을 의미하는가?
- ◆ 자연의 물질을 구성하는 기본입자와 기본상호작용 그리고 기본상호작용을 전달하는 매개입자에 의해서 자연을 일관되게 설명하는 이론체계를 표준모형이라고 부른다. 표준모형에서 말하는 기본입자에 대해 설명하라.

앞 장에서 보았듯이, 처음에는 양성자, 중성자, 그리고 전자 등 단지 3개로 출발하였던 소립자의 수가 시간이 지날수록 계속 증가되어 결국에는 소립자의 수가 수백 개에 이르게 되었다. 그래서 소립자라는 명칭이 아무래도 무색하게 되었다. 페르미는 자기가 소립자의 이름을 다 기억할 수 있다면 식물학자도 될 수 있었을 것이라고 말할 정도이었다.

원자란 그 내부에 어떤 다른 입자도 포함되지 않은 기본입자라고 믿고 있던 19세기에 멘델레프가 원자를 원자량에 따라 배열하여 만든 원소의 주기율표에서 비슷한 성질을 갖는 원소로 분류할 수 있었던 것은 원자가 더 이상 기본입자가 아닐 수도 있다는 증거가 되었다. 그리고 뜨거운 기체에서 나오는 빛을 프리즘에 통과시켜 얻은 선스펙트럼이나 제만 효과 등은 원자 내부의 구조에 대한 직접적인 증거가 되었다. 소립자에 대해서도, 소립자 내부를 직접 들여다보는 실험이 아니더라도, 소립자가 구조가 없는 기본입자가 아닐 수도 있다는 그런 증거가 나타나기 시작하였다.

원소의 주기율표를 만들기 위해 원자들을 배열할 때는 원자의 질량을 나타내는 원자량만을 기준으로 하였지만, 소립자의 경우에는 기준으로 삼을 양들이 더 많아졌다. 소립자들을 분류하는데 입자의 질량과 함께 입자의 고유스핀은 얼마인지 그리고 그것이 입자인지 아니면 반물질일지 가리키는 반입자인지도 중요한 지표가 되었다. 그 뿐 아니라 아직 우리가 소개하지 않은 다른 양들도 소립자를 분류하는데 편리하게 이용될 수 있음을 알게 되었다.

이처럼 수많은 소립자들이 발견되자 사람들은 원소의 주기율표에서 그랬던 것처럼 소립자들 중에서 비슷한 성질을 갖는 입자끼리 모아서 표를 만들게 되었다. 이번에는 질량만을 기준으로 하는 것이 아니라 아이소스핀이라든지 기묘도라고 불리는 새로운 양자수를 도입하여 분류에 이용하기도 하였다.

지난 30장에서 각운동량을 공부하면서 각운동량 양자수가 l 이면 각운동량의 z 축 방향 성분의 수는 $2l+1$ 개가 된다는 점을 알았다. 전자나 양성자는 고유퓪스핀이 $1/2$ 인데 그래서 전자나 양성자는 고유퓪스핀의 z 축 성분이 딱 두 가지이다. 그런데 앞의 40장에서 소립자를 분류한 표 40.1을 보면 질량이 비슷한 입자들 중에서 전하만 제외하고 고유퓪스핀이나 그 밖에 우리들이 아직 이야기하지 않은 모든 성질이 동일한 입자들이 있음을 알 수 있다. 양성자와 중성자가 그런 입자에 속하고 세 가지 종류의 파이메존들이 그러한 종류의 입자에 속한다. 양성자와 중성자의 경우에 양성자는 전하가 $+1$ 이고 중성자는 전하가 0 인 것만 제외하고 다른 것들은 모두 같다. 그래서 양성자와 중성자는 전하만 제외하면 동일한 핵자라고 불리는 입자이다. 그리고 파이메존의 경우에는 전하만 $+1, 0, -1$ 로 다른 것을 제외하면 나머지는 모두 같다. 세 가지 파이메존도 역시 전하만 제외하면 모든 면에서 동일한 입자이다.

바로 그런 사실을 반영하기 위해 아이소스핀이라는 새로운 양자수를 도입하여 소립자들을 설명하면 편리하다. 두 가지 전하 상태로 존재하는 양성자와 중성자는 아이소스핀이 $1/2$ 인 입자로 양성자는 아이소스핀의 z 축 성분이 $+1/2$ 이고 아이소스핀의 z 축 성분이 $-1/2$ 이라고 생각한다. 파이메존은 세 가지 전하 상태로 존재하므로 파이메존의 아이소스핀은 1 이고 표 40.1에 π^+ 이라고 표시된 파이메존은 아이소스핀의 z 축 성분이 $+1$ 인 입자이고, 표 40.1에 π^0 라고 표시된 파이메존은 아이소스핀의 z 축 성분이 0 인 입자이며, 표 40.1에 π^- 라고 표시된 파이메존은 아이소스핀의 z 축 성분이 -1 인 입자라고 생각하면 좋다. 그리고 바로 이 아이소스핀의 z 축 성분을 이용하면 소립자를 분류하는데 편리함을 곧 알게 된다.

소립자를 분류하는 또 다른 방법을 찾기 위하여 표 40.1의 가장 오른쪽에 표시한 소립자들의 붕괴방향을 보자. 한 번의 예외도 없이 바리온이 붕괴하면 오른쪽의 붕괴하고 난 뒤 생성되는 입자에도 꼭 바리온이 포함되어 있다. 이러한 원칙은 바리온이 붕괴할 때 뿐 아니고 소립자와 소립자가 충돌하여 반응하면서 다양한 입자들이 생성, 소멸될 때도 역시 성립한다. 바로 그런 특징을 설명하기 위해서 바리온 양자수라는 새로운 양자수가 도입되었다. 바리온 양자수는 바리온에게는 $+1$ 을 부여하고 바리온

의 반입자에게는 -1 을 부여한다. 그리고 바리온이 아닌 입자인 메존과 렙톤에는 모두 0 을 부여한다. 그러면 어떤 반응에서든지 반응 전의 입자들의 바리온 수의 합과 반응 후의 입자들의 바리온 수의 합이 한 번의 예외도 없이 동일하다는 점이 관찰되었다.

이렇게 관찰된 소립자들의 붕괴나 반응을 설명하기 위해 그 밖에 새로운 양자수들이 몇 가지 더 도입되어야만 하였는데, 소립자들의 정체가 무엇인지 모두 다 밝혀지기 전까지는 어쩔 수 없는 노릇이었다. 전에도 완전한 이론이 다 밝혀지기 전에는 왜 성립하는지는 잘 모르지만 경험법칙들이 먼저 만들어졌다는 것을 기억하자. 소립자 문제도 그런 과정을 거쳐서 언젠가는 해결될 것이라고 믿자. 그리고 사실은 이제 이미 많은 부분이 해결되었다.

그런데 소립자들의 붕괴와 생성 그리고 반응 등을 관찰하면서 위에서 설명한 것과 같이 양자수를 더 도입하는 것만으로는 설명될 수 없는 일이 발생하였다. 1947년에 파이메존이 우주선(宇宙線) 실험을 통해 발견된 직후 역시 우주선 실험에서 K^0 메존과 Λ^0 바리온이 발견되었는데, 이 입자들은 좀 이상하였다. 그림 41.1의 왼쪽에 보인 사진은 거품상자에서 소립자가 지나가는 흔적을 사진으로 찍은 것이다. 거품상자란 내부에 과포화 상태의 액체가 들어있어서 전하를 띤 소립자가 지나가면 지나간 길에

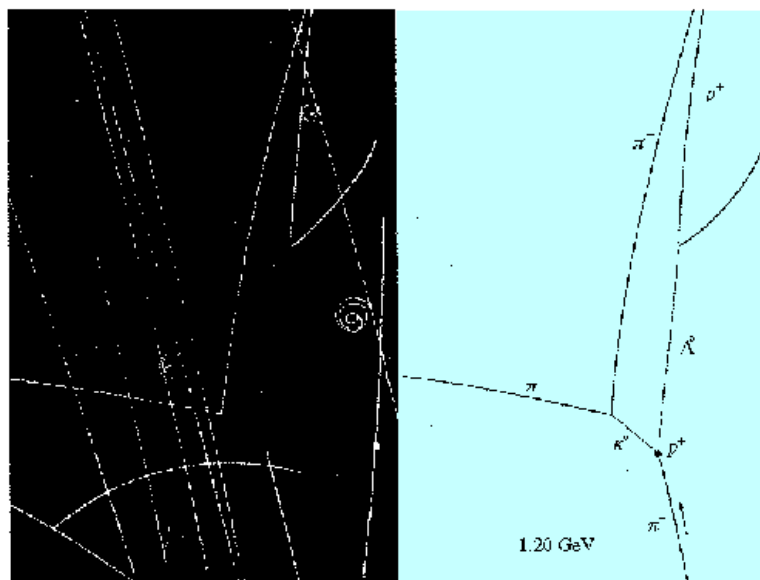


그림 41.1 거품상자로 측정한 소립자들이 지나간 흔적 사진

액체가 기화된 거품이 남아 입자가 지나간 흔적을 측정할 수 있는 장치이다. 이 거품 상자에 전기장과 자기장을 걸어주어 전하를 띤 입자가 자기장에서 휘어지는 경로의 모습을 보고 그 입자가 무슨 입자인지를 판별한다.

그림 41.1의 오른쪽 부분은 왼쪽에 보인 사진에서 중요한 부분을 발췌하여 표시한 것이다. 그림의 아래쪽에서 π^- 메존이 들어와 정지한 양성자 p^+ 와 충돌한 후 K^0 입자와 Λ^0 입자가 만들어졌음을 보여준다. 이 두 입자는 전하가 0이어서 사진에는 흔적이 남아있지 않다. 그러나 조금 뒤 K^0 는 π^+ 메존과 π^- 메존으로 붕괴하고 Λ^0 는 p^+ 와 π^- 메존으로 붕괴하였음을 알 수 있다.

그런데 여기서 관찰된 이상한 점이란 다음과 같다. 소립자들이 생성되거나 붕괴될 때 그 이유가 강력에 의한 것인지 또는 약력에 의한 것인지에 따라 구분될 수 있다. 중성자가 양성자와 전자로 바뀌는 베타붕괴는 약력에 의한 붕괴이다. 그런데 높은 운동 에너지를 가지고 매우 빨리 움직이는 소립자들이 충돌하여 많은 입자들이 생성될 때는 주로 강력에 의한 반응이 일어난다. 강력에 의한 반응과 약력에 의한 반응을 구별하는 데는 반응시간이 이용된다. 강력에 의한 반응을 대표하는 생성된 입자의 수명은 대략 10^{-23} 초 정도이다. 이것은 광속으로 원자핵의 크기인 $1\text{ fm} = 10^{-15}\text{ m}$ 를 지나가는 데 걸리는 시간 이다. 그런데 약력에 의한 반응을 대표하는 시간은 이보다 훨씬 느린 10^{-10} 초 정도이다.

그림 41.1에서 π^- 가 양성자와 충돌한 뒤 즉시 K^0 와 Λ^0 가 생성되었고, 이들 두 입자는 아주 긴 시간이 경과된 뒤에 다른 입자로 붕괴하였는데, 그것은 그림 41.1에서 두 입자가 보인 흔적의 길이가 상당히 긴 것으로부터 알 수 있다. 또한 그림 41.1을 분석하면 이 입자들의 수명이 10^{-10} 초 정도인 것을 알 수 있었다. 이것이 이상한 점이었다. 이 두 입자는 생성될 때는 강력에 의해 생성되었으나 붕괴할 때는 약력에 의해 붕괴한다는 점이 이상하였다. 당시 알고 있던 양자역학에 의하면 입자의 생성과 붕괴는 매우 밀접하게 연관되어 있어서 동일한 상호작용으로 일어나야 한다고 믿었기 때문이다.

그뿐 아니라 또 이상한 점이 있었는데, 그것은 K^0 와 Λ^0 가 절대로 하나씩 따로 생성되지 않고 항상 동시에 함께 생성된다는 점이었다. 그것이 참 이상하였지만 당시 실험으로 측정된 소립자들의 반응에서는 항상 성립하는 원칙 중의 하나이었으므로 1953년 일본 물리학자인 니시지마와 미국 물리학자인 겔만은 독립적으로 새로운 양자수를 제안하고 그 이름을 기묘도라고 불렀다. 기묘도를 영어로는 strangeness라고

한다. 그래서 소립자들이 만들어지거나 붕괴하는 등 서로 반응할 때 반응 전과 후에 보존되는 양자수인 전하와 바리온에 더하여 기묘도라는 양자수가 추가된 것이다. 예를 들어, 그림 41.1에서 관찰된

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0 \quad (41.1)$$

라는 반응이 관찰되었을 때 중전의 양자수만 이용한다면 바리온 수가 보존되는

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + \Lambda^0 \quad (41.2)$$

라는 반응도 관찰되지 않을 이유가 없는데 실제로는 절대로 관찰되지 않았던 것이다. 그래서 니시지마와 겔만은 당시까지 이미 알려져 있던 모든 소립자에게는 기묘도 S 가 0이라고 부여하고 Λ 입자는 기묘도 S 가 -1이며 K 메존은 기묘도 S 가 +1이라고 부여하는 것이 좋겠다고 제안하였다. 그러면 (41.1)식으로 주어진 반응에서는 반응 전이나 반응 후에 기묘도의 합을 계산하면 모두 0이기 때문에 반응이 진행될 수 있으나 (41.2)식으로 주어진 반응에서는 반응 전에는 기묘도의 합이 0이었는데 반응 후에는 기묘도의 합이 -1이기 때문에 반응이 진행될 수 없다는 것이다. 그런 이유로 새로운 소립자들이 관찰되면 반응이 가능하도록 그 입자에게 기묘도를 부여하게 되는데, 바리온 중에서 새로 발견된 Σ 입자에는 기묘도 -1을 Ξ 입자에는 기묘도 -2를 부여하여야 되었다.

이제 우리도 소립자에 대해서 원소의 주기율표와 같은 표를 만들 수 있을 만큼 준비가 되었다. 그런 표를 만드는데 이미 알려진 양자수로부터 다음과 같이 정의된 새로운 양자수를 만들면 매우 흥미롭게 되는 것을 알았다. 그렇게 새롭게 정의된 양자수를 초전하(超電荷)라고 부르고 Y 라는 문자로 표시하는데 초전하 Y 는 바리온 양자수 B 와 기묘도 양자수 S 를 더하여

$$Y = B + S \quad (41.3)$$

와 같이 정의한다. 초전하를 영어로는 hyper-charge라고 한다.

초전하 Y 를 아이소스핀의 z 성분 양자수 I_z 와 함께 이용하면 메존과 바리온에 속하는 모든 소립자의 전하 Q 가 다음 관계

표 38.2 메존과 바리온을 분류하는데 이용되는 양자수

종류	입자	B	S	Y	I_z	Q
메존	π^+	0	0	0	+1	+1
	π^0	0	0	0	0	0
	K^+	0	+1	+1	+1/2	+1
	K^0	0	+1	+1	-1/2	0
바리온	p	+1	0	+1	+1/2	+1
	n	+1	0	+1	-1/2	0
	Λ^0	+1	-1	0	0	0
	Σ^+	+1	-1	0	+1	+1
	Σ^0	+1	-1	0	0	0
	Ξ^0	+1	-2	-1	+1/2	0
	Ξ^-	+1	-2	-1	-1/2	-1

$$Q = I_z + \frac{Y}{2} \quad (41.4)$$

를 만족함을 알 수 있다. 몇 가지 알려진 입자에 대해 정말 그런지 보기위해 정리한 것이 표 40.1에 나와 있다. 이 표로부터 아이소스핀의 z 축 성분인 I_z 와 초전하 Y 로 구한 전하가 이미 알고 있는 소립자의 전하와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

이제 소립자들을 분류하여 마치 원소의 주기율표와 같은 표로 만들어 보자. 원소의 주기율표에서는 원자량이라는 한 가지 기준을 이용하여 원자량이 증가하는 순서로 원소들을 늘어놓았지만 소립자를 분류하는데 이용되는 기준은 한 가지 뿐이 아니었다. 이제 소립자를 중에서 우선 바리온만을 가지고 표로 만들자. 질량이 비슷하지만 전하가 다른 것들을 함께 늘어놓는데, 늘어놓는 기준은 아이소스핀의 z 축 성분과 초전하 Y 로 한다. 그렇게 표로 만든 결과는 그림 41.2와 같다.

그림 41.2에 보인 표의 모양이 아주 조화롭고 그럴듯하다는 것을 느낄 수가 있다. 그림 41.2에

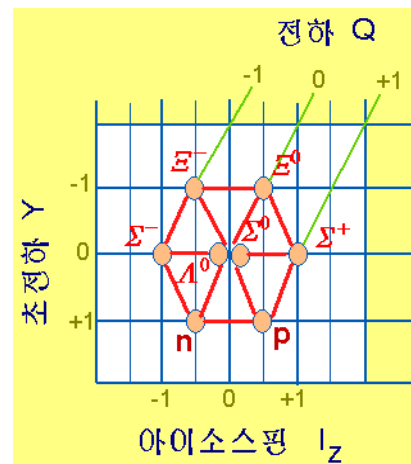


그림 41.2 바리온을 늘어놓은 그림

나온 표를 보면 삼각형 여섯 개가 틈새 없이 배열되어 형성된 정 6각형의 모양을 하고 있는 것을 알 수 있다. 여기서는 고유크스핀이 $\hbar/2$ 인 바리온만을 늘어놓은 것인데, 만일 고유크스핀이 $3\hbar/2$ 인 바리온들을 비슷한 방법으로 늘어놓으면 거꾸로 선 삼각형의 모양이 된다.

바리온을 늘어놓을 때만 이런 모양이 되느냐 하면 그렇지 않다. 이번에는 메존을 늘어 놓아보자. 기준은 바리온의 경우와 마찬가지로 아이소스핀의 z 성분 I_z 와 초전하 Y 이다. 그 결과로 얻는 모양이 그림 41.3에 보인 것과 같다. 바리온을 늘어놓은 그림 41.2의 모양과 똑같음을 알 수 있다. 이런 모양은 우연히 그렇게 되었다고는 볼 수 없다. 소립자들이 제각각 모두 독립적으로 존재하는 기본입자라면 이런 모양을 만들 수 없다. 이러한 그림은 소립자 내부에 더 기본적인 무엇인가가 포함되어 있고 그래서 여러 소립자들 사이에 공통점이 있기 때문이라고 생각할 수밖에 없는 증거가 되는 것이다.

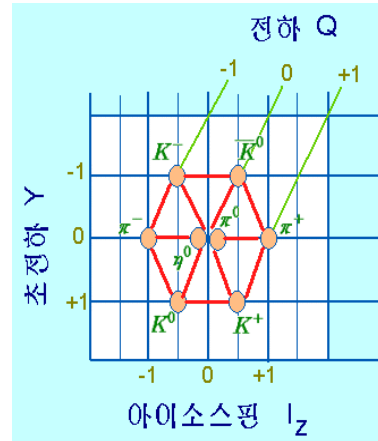


그림 41.3 메존을 늘어놓은 그림

원소의 주기율표가 처음 만들어졌을 때 표에는 아직 발견되지 않은 원소에 해당하는 빈칸들이 많았다. 사람들은 그 빈칸에 해당하는 원자를 찾기 위해서 적당한 화학 반응을 찾아서 실험함으로써 결국 그런 원자들을 모두 찾아내었다. 소립자에서도 그런 일이 있었다. 고유크스핀이 $3\hbar/2$ 인 바리온들을 초전하 Y 와 아이소스핀 I_z 를 기준으로 늘어놓으면 거꾸로 선 삼각형 모양이 되는데, 아래쪽 꼭짓점에 해당하는 바리온이 아직 발견되어 있지 않았다. 1962년에 그림 41.4에 보인 겔만은 그 꼭짓점 자리에 존재하여야 하는 고유크스핀이 $3\hbar/2$ 이고 전하가 -1 이며 기묘도가 -3 인 바리온은 질량이 대략 1680 MeV 쯤 되리라고 예상하고 실험 물리학자들에게 한번 찾아보라고 제안하였다. 곧 미국의 브룩하벤 국립연구소 가속기를 이용하여 그 입자를 찾기에 알맞은 충돌실험을 수행함으로써 바로 예언된 것과 똑같은 바리온이 생성되는 것을 확인하였다. 그것이 오메가 입자라고 불리는 바리온이다. 오메가 입자의 발견은 무엇인가 소립자들 내부에 구성요소가 있다는 생각이 틀리지 않았음을 확인되는 계기가 되었다.



그림 41.4 머리 겔만
(미국, 1929-)
1969년 노벨 물리학상 수상

다.

그 뒤 1964년에 이르러 겔만과 츠바이크는 서로 독립적으로 만일 메존과 바리온이 모두 단지 3가지 종류의 더 기본적인 입자로 구성되어 있다고 생각하면 고유크이 $\hbar/2$ 인 바리온에 대해 성립하는 그림 41.1에 보인 정6각형 모양이나 메존에 대해 성립하는 그림 41.2에 보인 정6각형 모양 그리고 고유크이 $3\hbar/2$ 인 바리온에 대해 성립하는 거꾸로 선 삼각형 모양 등을 모두 다 쉽게 이해할 수 있다고 제안하였다.

이렇게 제안된 소립자보다 더 기본적인 입자를 어떤 이름으로 부를지 마땅치가 않은 형편이 되었다. 기본적이라는 의미의 이름은 이제 다 사용해버리고 말았다. 겔만은 이 입자를 쿼크라고 불렀고 츠바이크는 이 입자를 에이스라고 불렀는데, 사람들이 쿼크라는 이름을 더 애용하였다. 그래서 지금은 그 기본입자를 쿼크라고 부른다. 쿼크라는 이름은 무슨 특별한 의미를 지니지 않는다. 겔만은 단순히 자기가 늘 즐겨 읊던 제임스 조이스의 시 가운데 한 구절에서 그 이름을 따왔다고 한다.

지금은 여섯 가지 종류의 쿼크가 존재한다고 알려져 있는데, 겔만과 츠바이크가 처음 제안한 것은 up 쿼크, down 쿼크, strange 쿼크라고 불리는 세 가지 종류이었다. 당시에 알려진 소립자는 이 세 가지 종류로 설명이 충분했던 것이다. 그 이후에 소립자들이 더 많이 발견되면서 필요한 쿼크의 숫자도 늘어났지만 지금 학자들은 여섯 가지가 존재할 수 있는 쿼크의 전부라고 생각하고 있다.

up 쿼크와 down 쿼크는 모두 기묘도가 0이고 바리온 수가 $1/3$ 이며 고유크이 $\hbar/2$ 인 기본입자이다. 다만 up 쿼크의 전하는 $+2e/3$ 이고 down 쿼크의 전하는 $-e/3$ 이다. 이처럼 쿼크의 전하는 그 전에 알려진 전자가 지닌 전하 e 의 정수배가 아니고 e 의 분수배이다. strange 쿼크는 기묘도가 -1 이고 바리온 수는 $1/3$ 이며 고유크이는 $\hbar/2$ 이고 전하는 $-e/3$ 이다. 이 세 가지 쿼크는 모두 반입자를 가지고 있으며 반입자의 경우에는 위의 양자수의 부호가 모두 바뀐다. 예를 들어 반 up 쿼크의 경우 전하가 $-2e/3$ 이고 바리온 수는 $-1/3$, 기묘도는 0이다. 그러나 고유크이는 각운동량의 크기를 말하므로 여전히 $\hbar/2$ 이다.

바리온은 이러한 쿼크 3개가 모여서 이루어져 있고 메존은 쿼크 2개가 모여서 이루어져 있는데 메존의 경우에는 하나가 쿼크이고 다른 하나는 반드시 반입자 쿼크이다. 예를 들어, 양성자는 up 쿼크 2개와 down 쿼크 1개, 중성자는 up 쿼크 1개와 down 쿼크 2개로 이루어져 있다. 기묘도가 -1 인 시그마 입자는 strange 쿼크 1개를

포함한다. 그래서 Σ^- 입자는 down 쿼크 2개와 strange 쿼크 1개, Σ^0 입자는 down 쿼크와 up 쿼크 그리고 strange 쿼크 각각 1개씩으로 이루어져 있으며 Σ^+ 입자는 up 쿼크 2개와 strange 쿼크 1개로 이루어져 있다. 이렇게 설명하면 그림 41.2에 보인 바리온의 6각형 모양이 쿼크가 1개씩 교환되는 방법으로 아주 그럴 듯하게 설명된다.

그러나 쿼크가 처음 제안된 1960년대 중반에는 기본입자로서 쿼크가 실제로 존재하는 입자인지 아니면 단순히 소립자의 분류를 그럴듯하게 설명하는 수학적인 모형에 불과한지에 대해 논란이 많았다. 우선 쿼크가 분수인 전하를 띄고 있다는 것이 쿼크를 쉽게 받아드리지 못하는 이유 중에 하나이었다. 그리고 바리온이나 메존을 아무리 센 에너지로 때려주더라도 소립자 내부에서 쿼크를 떼어내는 실험에서 성공하지 못하였던 것도 쿼크를 바로 받아드릴 수 없었던 이유였다. 다시 말하면 독립적으로 존재하는 쿼크를 관찰할 수가 없었던 것이다.

오늘에 이르기까지 아직도 독립적으로 존재하는 쿼크를 실험으로 관찰하지는 못하고 있다. 그러나 쿼크가 존재하여야만 한다는 증거가 너무 많기 때문에 지금은 쿼크의 존재를 의심하는 사람은 없다. 그리고 왜 독립된 쿼크를 관찰하지 못하는지에 대한 이유도 이해하고 있다고 생각한다. 그뿐 아니라 이 쿼크를 포함하여 자연을 구성하는 궁극적인 기본입자가 무엇인지에 대한 의문도 대부분 풀렸다고 생각한다. 오늘날 물리학자들이 도달한 물질을 구성하는 궁극적인 기본입자와 자연에 존재하는 기본상호작용에 대해 설명하는 이론을 표준모형이라고 부른다.

겔만과 츠바이크가 원래 제안한 쿼크는 up 쿼크, down 쿼크, 그리고 strange 쿼크 등 세 가지뿐이었으나 1964년에 이미 렙톤과 연관하여 제4의 쿼크가 존재하여야 할 것으로 제안되기도 하였다. 렙톤으로 전자만 존재할 때는 쿼크가 3개만 있으면 되었으나 당시 발견된 뮤온도 역시 전자와 똑같은 성질을 가진 렙톤임이 밝혀지면서 이를 설명하려면 쿼크가 더 필요하게 되었던 것이다. 그러나 그 때는 그러한 제안을 진지하게 받아드리는 학자가 많지 않았는데, 그림 41.5에 보인 글래쇼와 그림 41.6에 보인 보르겐 등 두 미국 물리학자가 네 번째 쿼크의 이름을 charm



그림 41.5 셸던 리 글래쇼
(미국, 1932-)
1979 노벨 물리학상 수상



그림 41.5 제임스 보르겐 (미국)

쿼크라고 명명하고 그 존재를 심각하게 고려하였다. 그런데 이와 같은 쿼크의 명칭에서 알 수 있는 것처럼, 이제 새로운 입자의 명칭은 어떤 특별한 의미를 갖기보다는 새 명칭을 제안하는 물리학자들의 취향이나 익살이 반영되었다고도 볼 수 있다.

이런 식으로 소립자에 대해 더 많이 알게 되고 물리학의 기본 이론이 발전해 나감에 따라서 쿼크의 수가 조금씩 늘어나기 시작하였지만 소립자의 경우처럼 그 수가 무한정 많아지는 것이 아니라 쿼크에서는 그 수가 여섯 개에서 늘어나는 것을 멈추었다. 그렇게 상당한 기간이 경과한 뒤 지금은 소립자의 분류와 성질 그리고 그 밖에 자연의 동작원리를 설명하는 데 있어 어느 정도 안정을 찾게 되었고 이제 사람들은 지금까지 수행이 가능한 거의 모든 실험 결과를 설명할 수 있는 이론을 갖게 되었다고 믿고 있다.

표준모형은 미시세계의 동작원리를 설명하는 이론이며 또한 미시세계를 구성하는 구조가 없는 궁극적인 기본입자와 이들 기본입자들 사이의 기본상호작용에 대한 이론이다. 표준모형에서는 궁극적인 기본입자가 크게 두 가지 종류로 나뉜다. 하나는 물질을 구성하는 입자이고 다른 하나는 상호작용을 매개하는 입자이다. 그리고 기본상호작용은 우리가 이미 알고 있는 전기력과 강력 그리고 약력이다. 미시세계에서는 너무 약한 만유인력은 고려하지 않는다.

물질을 구성하는 기본입자는 그림 41.6에 보인 것과 같은 6개의 쿼크와 6개의 렙톤으로 구성되어 있다. 쿼크와 렙톤은 모두 고유타가 $\hbar/2$ 인 페르미온이다. 물질을 구성하는 입자는 모두 페르미온인 것이다. 이들 12개의 물질을 구성하는 기본입자 각각에 대응하는 반입자도 또한 존재한다. 그래서 반입자까지 포함하면 물질을 구성하는 기본입자는 모두 24개가 된다.

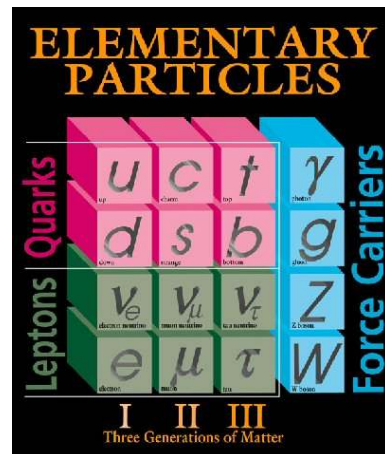


그림 41.6 표준모형의 기본입자

쿼크는 그림 41.6에 보인 것처럼, up(u), down(d), charm(c), strange(s), top(t), bottom(b) 등의 이름으로 불린다. 사진의 위쪽 줄에 나온 u, c, 그리고 t 쿼크의 전하는 모두 $+2e/3$ 이고 아래쪽 줄에 나온 d, s, 그리고 b 쿼크의 전하는 모두 $-e/3$ 이다. 이 쿼크들이 (u, d), (c, s), (t, b) 등 세 가족으로 짝 지워져 있는데 각각의 짝을 가족이라고 부른다. 여기서 가족을 영어로는 family라고 한다. 또한 쿼크를 u, d, c,

s, t, b 등으로 구별할 때는 쿼크의 맛이 다르다고 한다. 여기서 맛을 영어로는 flavor라고 한다. 그래서 쿼크는 여섯 가지 맛으로 구성되어 있고 이들이 두 개씩 모두 세 가족을 이루고 있다고 한다.

렙톤은 이미 이야기한 것처럼 전자(e)와 뮤온(μ) 그리고 타우온(τ) 등 전자와 성질이 동일한 입자들과 각 렙톤에 대응하는 전자뉴트리노(ν_e), 뮤온뉴트리노(ν_μ), 그리고 타우온뉴트리노(ν_τ) 등으로 구성되어 있다. 렙톤 중에서 e와 μ 그리고 τ 는 전하가 $-e$ 인 입자이고 ν_e, ν_μ, ν_τ 등 세 뉴트리노들은 전하가 없는 입자들이다. 렙톤도 그림 41.6에 보인 것처럼 두 개씩 짝을 지어 가족을 이룬다. 실제로 (u, d) 쿼크와 (ν_e, e) 렙톤은 한 가족을 이룬다고 하고 (c, s) 쿼크와 (ν_μ, μ) 렙톤이 두 번째 가족을 이루며 (t, b) 쿼크와 (ν_τ, τ) 렙톤이 세 번째 가족을 이룬다고 한다. 소립자의 붕괴와 생성 과정에서 가족 내에서 반응이 일어나는 경우와 가족을 뛰어 넘어 반응이 일어나는 경우가 엄격하게 구별된다.

쿼크는 전하와 고유퓪스핀 이외에 색이라고 부르는 성질을 가지고 있다. 영어로는 color라고 부르는 색은 전하처럼 기본입자가 가지고 있는 고유한 성질이다. 이 성질을 색이라고 부르는 이유는 쿼크가 우리 눈에 보이는 색깔을 띠고 있어서가 아니라 이 성질에는 세 가지의 종류가 존재하기 때문이다. 전하에 양전하와 음전하 등 두 가지 종류가 존재하는 것은 전기력이 작용하는 모양을 보고 알았음을 기억하자. 쿼크가 지닌 색이라는 성질은 쿼크 사이에 강력을 작용하게 하는 원인이 된다.

강력과 관계된 여러 가지 실험 사실로부터 색에는 세 가지 종류가 존재함을 알게 되었다. 그리고 세 가지 색을 red(r), green(g), 그리고 blue(b)라고 구분하여 부른다. 어떤 쿼크든지 이 세 가지 색 중에서 어느 한 가지 색을 가질 수 있다. 즉 u 쿼크가 red 일수도 있으며 green 일수도 있고 blue 일수도 있다. 그리고 쿼크의 반입자는 입자가 갖는 색의 보색을 가지고 있다.

쿼크가 모여 바리온과 메존을 만든다. 바리온은 쿼크 세 개로 구성되어 있다. 예를 들어 양성자는 (u, u, d) 쿼크로 이루어져 있고 중성자는 (u, d, d) 쿼크로 이루어져 있다. 쿼크에는 기묘도 양자수도 부여된다. u 쿼크와 d 쿼크의 기묘도는 0이고 s 쿼크의 기묘도는 -1 이다. 그래서 기묘도가 0인 바리온은 s 쿼크를 포함하지 않고 기묘도가 -1 인 바리온은 s 쿼크를 한 개, 기묘도가 -2 인 바리온은 s 쿼크를 두개 포함하고 있다.

쿼크들이 3개 모여 바리온을 만들 때 꼭 지키는 규칙이 있다. 그것은 쿼크들의 색을 모두 더하면 백색이 되어야 한다는 것이다. 예를 들어 양성자의 경우 두 u 쿼크의 색이 각각 red와 green이고 나머지 d 쿼크의 색이 blue 일 수 있다. 그러면 이들이 삼원색이므로 모두 더해 백색이 된다. 이것은 마치 전기력에 의해 구성된 원자는 전기적으로 중성인 것만 존재하는 것과 비슷하다. 바리온은 쿼크들이 강력에 의해 결합되어 만들어진 것인데 쿼크들이 모두 합하여 백색을 이루지 않으면 바리온으로 존재할 수 없는 것이다. 만일 쿼크가 단독으로 존재한다면 백색이 될 수가 없다. 이것이 쿼크를 따로 떼어 내지 못하는 이유를 가장 간단히 설명할 수 있는 방법이다.

메존은 두 개의 쿼크로 구성되어 있다. 그런데 보통 쿼크 두 개로는 백색을 만들 수가 없다. 그래서 메존은 쿼크와 반쿼크로 구성되어 있다. 반쿼크의 색은 쿼크 색의 보색이며 그래서 쿼크와 반쿼크가 모이면 백색을 이룰 수가 있다.

우리는 앞에서 소립자를 질량에 따라 렙톤과 메존 그리고 바리온으로 분류했었다. 그런데 렙톤은 여전히 구조가 없는 기본입자인 채로 남아 있지만 메존과 바리온은 더 기본이 되는 쿼크들이 모여서 만들어졌기 때문에 기본입자가 아니라 복합 입자임을 알게 되었다. 메존과 바리온은 강력에 의해 쿼크들이 모여 만들어지는 입자이므로 이들 두 가지 종류의 입자를 함께 강입자 또는 하드론이라고 부른다. 하드론을 영어로는 hadron이라고 쓴다.

하드론 중에서 양성자나 중성자 같은 바리온은, 고유헤르미온이 $\hbar/2$ 로 페르미온인 쿼크 세 개가 모여, 고유헤르미온이 $\hbar/2$ 인 페르미온이 된다. 그러므로 바리온은 원자핵을 구성하는 등 물질을 이루는 요소가 된다. 그러나 하드론 중에서 파이메존이나 K메존 그리고 에타메존과 같은 메존은, 고유헤르미온이 $\hbar/2$ 로 페르미온인 쿼크 두개가 모여, 고유헤르미온이 0이나 $\hbar$ 인 보존이 된다. 보존은 물질을 이루는 요소가 될 수 없다. 우리가 앞에서 공부한 것처럼 파이메존 등 메존은 핵력을 매개하는 입자의 구실을 한다.

바리온과 메존이 이와 같이 쿼크로 구성되었다고 하면 아이소스핀과 초전하를 기준으로 바리온과 메존을 나열하였을 때 만들어지는 표로 그림 41.2와 41.3에 보인 정6각형 모양을 그럴듯하게 설명할 수 있다. 사실은 그러한 것들을 그저 그럴듯하게 설명할 수 있을 뿐 아니라 군론(群論)이라는 수학을 이용하면 소립자들의 분류가 아주 중요한 수학적 성질을 가지고 있는 것을 알게 된다. 그런 이유로 바리온이나 메존이 쿼크로 구성되어야 한다고 제안되었다.

쿼크와 함께 물질을 구성하는 기본입자인 여섯 가지의 렙톤 중에서 전자와 뮤온 그리고 타우온은 모두 전하를 가지고 있으므로 적당한 실험에서 어렵지 않게 관찰될 수 있다. 그러나 뉴트리노는 질량도 거의 0이며 전하도 가지고 있지 않고 색도 가지고 있지 않아서 전기력이나 강력의 영향을 받지 않고 오직 약력의 영향만 받는다. 그래서 실험으로 뉴트리노를 관찰하기란 쉽지 않다.

뉴트리노는 관찰하기만 쉽지 않을 뿐 아니라 거의 모든 물질과 전혀 상호작용을 하지 않고 그냥 관통해 지나가 버린다. 예를 들어 지구로 온 뉴트리노는 지구를 그냥 관통해서 지나간다. 그래서 뉴트리노를 직접 측정하는 일은 쉬운 일이 아니다. 실험 학자들이 뉴트리노를 측정할 때는 뉴트리노에 의해 유발되는 반응을 가지고 생성된 다른 입자를 관찰하여서 뉴트리노가 지나 간 것을 알아차린다. 그리고 뉴트리노만 측정하기 위한 실험은 보통 땅 속 깊은 곳에 장치를 만들어 수행한다. 땅 속 깊은 곳까지 갈 수 있는 입자는 뉴트리노 밖에 없기 때문이다.

뉴트리노가 처음 알려졌을 때는 그 질량이 정확히 0이라고 생각하였다. 그러나 오늘날에는 뉴트리노가 가지고 있을지도 모르는 매우 조그만 질량이라도 아주 중요하게 되었기 때문에 뉴트리노의 질량을 알아내려는 실험이 활발히 진행 중이다. 비록 뉴트리노의 질량이 대단히 작다고 할지라도 이 우주에는 뉴트리노가 무척 많이 존재하고 있고 그들 뉴트리노의 질량을 모두 합하면 상당히 큰 양이 될 것이기 때문이다.

그럼 41.6에 보인 것처럼, 표준모형에 의하면 자연에 존재하는 기본입자에는 물질을 구성하는 기본입자와 함께 상호작용을 매개하는 기본입자도 존재한다. 우리는 이미 자연에 존재하는 상호작용에는 모두 네 가지가 있으며 이 네 가지가 각각 자연의 특별한 부분의 구성을 책임지고 있음을 공부하였다. 한 번 더 설명한다면, 중력은 태양계나 은하계 등 거시세계를 구성한다. 그리고 전기력은 전자를 원자핵 주위에 붙잡아 두어 원자를 구성하게 한다. 그리고 강력은 원자핵에 양성자와 중성자가 함께 있게 만들고 쿼크들이 바리온과 메존을 구성하게 만든다. 마지막으로 약력은 아직 그 정체가 아주 잘 밝혀진 것은 아니지만 베타 붕괴와 같이 어떤 기본입자가 다른 기본입자로 전환하는데 중요한 역할을 한다.

표준모형에서는 만유인력을 직접 다루지는 않는다. 그것은 미시세계를 구성하는 입자의 질량은 너무 작기 때문에 만유인력이 전혀 작용하지 않는다고 생각하여도 조금도 과하지 않기 때문이다. 그러나 현재 중력의 양자화 등을 연구하여 중력도 표준

모형에 포함시키려는 노력이 활발히 진행 중이다.

기본상호작용을 매개하는 입자란 상호작용이 작용될 때 상호작용을 주고받는 두 물체 사이에 그 매개 입자가 교환되면서 상호작용의 효과가 나타난다는 의미를 지닌 입자이다. 지금까지 우리는 두 입자 사이에 상호작용이 작용하는 것을 두 입자가 힘을 주고받는다고거나 아니면 한 입자가 상대입자에 작용하는 힘을 거스르며 이동시킬 때 해주는 일을 의미하는 퍼텐셜 에너지 등으로 설명하였다. 그러나 상호작용을 좀 더 기본적으로 설명하는 방법이 바로 상호작용하는 두 입자 사이에 매개입자가 교환된다고 기술하는 것임이 밝혀졌다. 그러한 방법으로 상호작용을 설명하는 이론을 양자장론이라고 한다.

두 전하를 갖는 입자 사이에서 전기력을 매개하는 입자는 광자(光子)로 그림 41.6에 γ 라고 표시된 입자이다. 광자란 전자기파인 빛을 입자라고 생각할 때 부르는 이름이다. 광자는 고유헤가 h 인 보손이며 정지질량은 0인 입자이다. 광자는 전하를 갖는 입자 사이에서 전기력을 매개하는 입자이지만 광자 자신은 전하를 가지고 있지 않다. 그래서 광자와 광자 사이에는 전기력이 작용하지 않는다.

쿼크와 쿼크 사이에 작용하는 강력을 매개하는 입자를 글루온이라고 부르는데 그림 41.6에는 g 라고 표시되어 있다. 글루온도 보손이며 질량이 0인 입자로서 색을 띤 쿼크 사이에서 강력을 매개하는 입자인데 광자와는 대조적으로 글루온의 경우에는 자신도 색을 가지고 있어서 글루온 사이에도 강력이 작용한다. 바로 그 점 때문에 강력은 매개입자인 글루온의 질량이 0임에도 불구하고 매우 짧은거리에서만 작용하는 힘이라는 특징을 갖게 된다.

마지막으로 약력을 매개하는 입자에는 세 가지가 있는데, 모두 질량이 매우 큰 보손으로 W^+ , W^- 등 전하를 띤 두 입자와 Z^0 라고 불리는 전기적으로 중성인 입자 등이 있다. 1983년에 수행된 양성자와 반양성자를 충돌시킨 입자가속기 실험에서 이들 세 가지 종류의 입자가 실제로 만들어지는 것이 직접 관찰됨으로써 약력에 대한 이론이 확인될 수 있었다.

이처럼 표준모형은 물질을 구성하는 쿼크와 렙톤, 그리고 기본상호작용과 이들을 매개하는 입자에 대한 이론으로 표준모형을 이용하면 지금까지 관찰된 미시세계의 여러 가지 실험 결과를 매우 정확하게 설명할 수 있다. 그러나 사람들은 표준모형이 완벽한 이론이라고 생각하지는 않는다. 표준모형도 역시 몇 가지 아직 해결하지 못하

는 문제점을 안고 있다. 그래서 물리학자들은 좀 더 완전한 이론을 찾기 위해 다방면으로 연구를 진행하고 있다. 예를 들어, 물리학자들은 쿼크와 렙톤의 가족에는 왜 세 가지만 있는지를 아직 설명하지 못한다. 그리고 왜 쿼크와 렙톤이 알려져 있는 만큼의 질량을 갖고 있는지도 설명하지 못하고 있으며 우리가 알고 있는 기본상호작용의 세기가 왜 각기 차이가 나는지도 이해하지 못하고 있다.