

# ‘중성미자’로 우주생성 비밀을 푼다

글\_ 김수봉 서울대학교 물리학과 교수 sbkim@phya.snu.ac.kr

오랫동안 신비의 입자로 알려져 왔던 중성미자에 대한 의문이 최근 하나씩 밝혀지면서 이 입자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국, 일본, 유럽 여러 나라에서 중성미자에 관한 연구 수행에 집중 지원하고 있음이 그것을 잘 말해 주고 있다.

## 우주를 꽉 채운 ‘겨우 존재하는 입자’

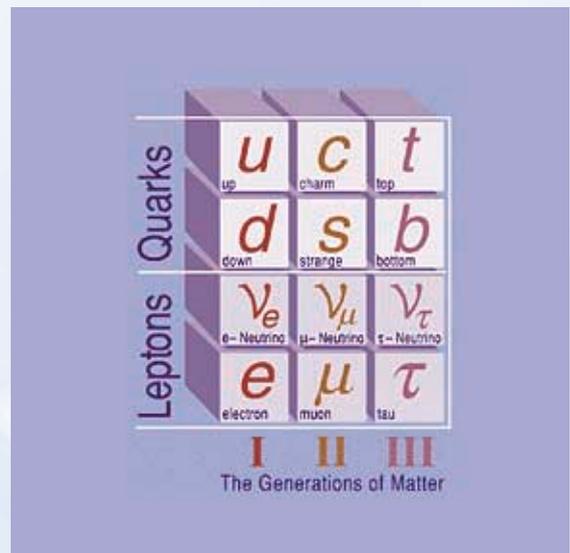
빅뱅우주론에 의하면 약 150억 년 전 대폭발 직후의 초기우주는 아주 작은 공간에 오직 기본입자들만 존재하는 소립자의 세계였다. 그런데, 빅뱅 폭발 후 약 1초가 경과할 무렵 기본입자의 하나인 중성미자가 나머지 다른 입자들과 더 이상 충돌하지 않고 자유로이 우주를 돌아다니게 되었다. 이 때부터 중성미자는 우주의 진화에 더 이상 참여하지 못하게 되었다. 당시에 분리된 초기 우주의 중성미자들은 현재에도 매우 작은 에너지를 가지고 우주를 떠돌아다니는 ‘우주배경 중성미자’로서 무수히 많이 존재하지만 아직 관측하지 못하고 있다. 만약 이 우주배경 중성미자를 관측하게 되면 초기우주에 존재하던 입자의 총 개수를 측정하게 되고 빅뱅의 초기우주론을 검증할 수 있다. 예를 들어, 초기 우주에 만들어진 가벼운 원소의 양은 중성미자 개수와 밀접한 관련이 있다.

우주를 구성하면서 더 이상 쪼갤 수 없는 기본입자는 6개의 쿼크와 질량이 상대적으로 가벼운 6개의 경입자이다. 중성미자는 경입자로서 전자중성미자, 뮤온중성미자, 타우중성미자의 세 종류가 있으며, 이에 대응하여 전자, 뮤온, 타우 입자가 있다.

중성미자는 핵붕괴나 핵융합 과정에서 방출되는 입자이며, 우주를 꽉 채우고 있을 정도로 무수히 많이 우주에

분포하고 있다. 하지만, 물질과의 작용이 거의 없을 정도로 작아서 관측하기가 매우 어려운 입자이다. 중성미자는 전하도 없고, 아직 측정되지 않을 정도로 질량도 거의 없으며, 다른 입자들과 상호작용을 거의 하지 않아 검출하기가 매우 어려운 소립자이다. 예를 들어  $10^{40}$ 개(100억 개의 100억 배, 또 100억 배, 그리고 또 100억 배가 되는 개수)의 중성미자가 면적이  $1\text{cm}^2$ 인 물질을 통과하면 겨우 몇 개만 반응하고 나머지는 그대로 통과하기 때문에, 관측이 매우 어렵다는 이유로 노벨상 수상자 레더먼은 이를 ‘겨우 존재하는 입자’로 불렀다.

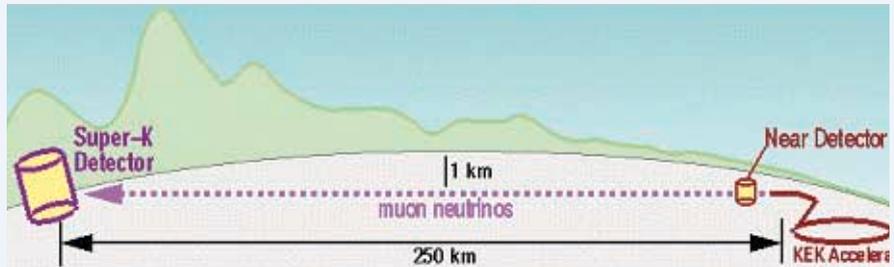
우주에 존재하는 중성미자는 초기우주의 우주배경 중성미자뿐만 아니라, 초신성 폭발에 의한 방출, 태양과 같은 별 내부에서 일어나는 핵융합 반응에 의한 방출, 원자



우주의 기본입자는 6개의 쿼크(quark)와 6개의 경입자(lepton)로 구성되어 있다.



고에너지연구소(KEK)에서 가속기로 만든 중성미자를 250km 떨어진 슈퍼카미오칸데로 투사하여 도중에 변환이 일어남을 규명한 실험의 개념도(아래)와 이 실험을 수행한 국제공동연구진(위)



력 발전소에서 핵붕괴에 의한 방출, 격렬한 반응을 일으키는 천체에서 고에너지 중성미자의 방출, 우주에서 날아온 우주선이 지구 대기의 분자와 충돌해 생성하는 중성미자 등으로 다양하다.

태양의 핵융합 에너지 일부를 방출하여 태양을 식히는 역할을 하는 중성미자는 지구상에서 매 초당 수백억 개가 엄지손톱 만한 면적을 통과한다. 매우 무거운 별은 일생을 마치게 될 즈음 초신성이 되는데, 폭발과 함께 중심부에서 중성미자가 대량으로 방출된다. 초신성이 폭발할 때 에너지를 방출해야 하는데 중성미자는 물질과 거의 반응을 하지 않기 때문에 가장 효과적으로 에너지를 방출하는 수단이 된다. 아마 중성미자가 없었다면 별은 죽고 싶어도, 터지고 싶어도 그러하지 못했을 것이다. 별의 생성과 소멸, 이러한 진화과정 자체를 중성미자가 적당하게 조절하는 역할을 한다고 하겠다.

### 질량이 거의 없는 입자

19세기 후반 방사성 물질의 붕괴가 최초로 발견된 후 핵붕괴 과정에서 물리학의 기본이 되는 에너지와 운동량 보존 법칙이 깨어지는 위기에 처해 있었다. 1930년, 파울리가 '관측할 수 없는 중성 미립자'의 존재 가설을 호소한 것이 이 신비 입자의 발단이다. 당시, 학계의 반응은

냉소적이었으며 1934년에 이르러야 페르미의 천재성에 의해 그 중요성이 인정되어 베타방사붕괴이론에 도입됨으로써, 드디어 학자들의 이목을 끌게 되었다. 중성미자는 약 25년이 지난 후인 1956년이 되어서야 라이네스와 코웬에 의해 원자로에서 검출에 성공하였다. 이 업적으로 라이네스는 거의 40년이 지난 1995년에 노벨상을 받았다.

1962년 두 번째의 중성미자, 즉 뮤온중성미자를 발견한 레더먼, 슈왈츠, 슈타인버거는 1988년에 노벨상을 받았다. 우주에서 방출된 중성미자를 관측하여 인간의 우주를 보는 시야를 넓히고 '중성미자 천문학'을 탄생시킨 공로로 코시바와 데이비스가 2002년 노벨상을 받았다. 현재까지 중성미자와 관련된 연구에 세 번의 노벨상이 주어졌는데, 중성미자의 성질 하나하나가 밝혀질 때마다 물리학 등에 엄청난 파장을 일으킬 만큼 중요한 분야로 인식되고 있다.

1956년 중성미자의 존재가 실험적으로 판명된 후, 중성미자의 질량을 측정하고자 많은 시도가 있었으나 실험 정밀도의 한계 때문에 질량을 측정하지 못하고 있다. 1998년 이전까지 중성미자 질량의 유무조차도 알지 못하였는데, 이 입자의 질량이 아예 없던지 지금까지의 실험 정밀도로는 측정하기 힘들 정도로 질량이 아주 작은 것으



원자력발전소에서 방출되는 중성미자가 변환하기 전에 원자로 근처에서 개수를 정확히 측정하고 약 1.5km 떨어진 곳의 검출기에서 다시 측정하여 날아가는 도중에 중성미자가 진동 변환하여 개수가 줄어든 정도로서 아직도 측정하지 못한 변환 상수를 측정하게 된다.

로 판단되었다.

질량을 직접 측정하기 어렵다 할지라도 우선 중성미자의 질량유무를 확인하는 것도 아주 중요하다. 입자물리학에서 가장 성공적인 이론으로 꼽히는 표준모형은 입자의 상호작용을 단순한 가정에서 놀라울 정도로 정확하게 기술하고 있다. 중성미자의 질량이 없다는 가설하에 세워진 이론이다. 실험조차 한계내에서는 지금까지 몇 십년에 걸쳐 시행된 모든 실험의 결과가 이 표준모형에 예측하는 것과 한 치의 차이도 없이 일치한다. 따라서 중성미자의 질량이 존재함을 밝혀낸다면 표준모형이 수정되어야 하고 새로운 물리학이 있다는 증거를 제시하는 것이나 마찬가지이다. 다시 말하자면, 중성미자의 질량을 알아내는 것은 바로 표준모형 이상의 미지 이론을 탐구하는 셈이다.

### 끊임없이 변하는 입자

비록 중성미자의 질량을 직접적으로 측정하지 못하더라도 질량 존재를 검증하는 방법을 알게 되었다. 1962년 폰테코르보가 만약 중성미자의 질량이 존재한다면 시간이 지남에 따라 서로 다른 세 종류의 중성미자들 사이의 변환이 끊임없이 일어나는 현상, 소위 '중성미자 진동 현상'이 가능함을 제시하였다. 중성미자의 질량이 있다면 중성미자는 검출기까지 이동하는 동안 다른 종류의 중성미자로 바뀌는 과정을 거치는 양자역학적 파동의 현상이 일어난다고 하였다. 즉, 중성미자가 만들어져 검출기까지 움직이는 동안 변환이 일어나, 검출기에서는 원래의 중성미자가 진동과정에서 생긴 다른 종류의 중성미자와

서로 함께 검출이 된다. 중성미자 변환의 진동을 관측하면 중성미자의 질량 존재를 확인하는 셈이 된다.

1998년, 우주에서 날아오는 입자에 의해 대기에서 만들어지는 중성미자를 일본의 지하 폐광에 위치한 검출기로 관측하는 과정에서 서로 다른 종류의 중성미자로 변환됨을 알게 되었고 중성미자의 질량이 존재한다는 매우 중요한 결과를 얻었다. 이 역사적 결과가 발표되었던 논문은 입자물리실험 분야에서 지금까지 최다(2000회 이상) 인용된 논문으로 인정받고 있으며, 이 결과로 인하여 중성미자와 관련된 4번째 노벨물리학 수상자를 배출하리라 기대하고 있다. 그 이후, 일본 고에너지연구소의 입자 가속기를 사용하여 인위적인 중성미자 빔을 만들어서 약 250km 떨어진 검출기에 투사하는 국제공동연구진에 의해 수행된 실험에서 중성미자가 날아가는 도중에 중성미자의 변환이 일어남을 확고히 규명하였다.

이 실험에서 한국 연구진은 중성미자 검출기 제작, 데이터 수집 및 분석 연구를 통하여 큰 역할을 하였다. 막대한 비용이 드는 이런 실험 시설이 아직까지 국내에는 없어, 중요한 발견이 기대되는 연구를 위해서 선진국에서 수행되는 실험에 국제공동연구진으로 참여해야만 되었던 것이 여태까지의 실정이었다. 하지만, 국제공동실험의 경우에는 획기적 연구 결과에 대한 노벨상과 같은 공적은 연구 시설을 보유한 국가에 돌아가게 된다.

### 국내서도 중성미자 변환 연구 가능해져

중성미자 변환과 질량 존재의 발견은 물리학의 새로운 분야를 개척하였다는데 의심의 여지가 없다. 중성미자의

변환은 쿼크 입자들 사이의 변환만이 아니라 서로 다른 종류의 경입자들 사이에서도 변환이 일어남을 입증하였다. 이제 앞으로 수십 년 동안 중성미자를 포함한 경입자들의 변환을 정밀 연구하게 될 것이다. 지금까지의 결과에 의하면 경입자의 변환에서는 쿼크들 사이의 변환과는 전혀 다른 구조가 존재할지도 모른다는 가능성을 암시하고 있다.

중성미자의 변환에 관련된 물리적 상수가 4개 있으며 현재까지 그 중에서 2개의 상수는 측정이 되었으나 앞으로 나머지 두 상수가 측정되어야 한다. 이 변환 상수는 소립자의 기본성질과 관련된 매우 중요한 물리적 양이며, 빅뱅 직후 우주의 물질과 반물질이 비대칭적인 것과 관련된 'CP 대칭성 깨짐'의 정도와 밀접하게 결부되어 있다. 이 변환 상수를 측정하기 위해 일본과 미국에서는 약 1조 원 이상의 가속기를 건설중에 있으며, 그 결과가 2012년경 나오리라 기대되고 있다.

최근, 물리학자들은 가속기를 사용하지 아니하고 원자력발전소에서 방출되는 중성미자를 이용하여 저렴하게 이 변환 상수를 측정할 수 있는 가능성에 대하여 논의하여 왔다. 원자력발전소에서 엄청난 수의 중성미자가 방출되지만 물질과 거의 반응하지 않고 끊임없이 빛의 속력으로 우주 끝을 향하여 퍼져나가고 있다. 흥미롭게도 가속기를 이용한 실험 결과가 나오기 이전에 물리학적으로 아주 중요한 변환 상수를 측정할 수 있으리라는 결론을 얻었으며, 6개의 국가(프랑스, 미국, 일본, 중국, 브라질, 한국)에서 2009년경에 이 실험을 시작하고자 추진중이다.

국내에서는 2003년말부터 실험 가능성에 대한 조사에 착수하여 이 실험의 경쟁에서 우위적인 측면이 많음을 확인하고 2005년 2월 브라질에서 개최된 학회에서 정식으로 추진 입장을 밝혔다. 국내의 영광발전소는 세계 두 번째로 많은 전력생산 능력을 가지고 있어 이에 비례하여 매우 많은 중성미자를 방출하는 이점을 가지고 있다. 중성미자의 효과적 관측을 위하여 지하 검출 시설이 필요한데 영광발전소는 원자로에서 150m 거리에 약 90m 높이의 산과 1.5km에 약 260m 높이의 산이 있어 이 실험을 위해서는 매우 이상적인 입지 조건을 가지고 있는 셈이

다. 외국의 경우 원자력발전소 주변에 산이 없어 지상에서 수직으로 땅을 파고 들어가 실험 시설을 구축하여야 하는데 이 경우 공사비용이 엄청나게 늘어나는 단점을 안고 있다. 그 동안 가속기 시설이 없어 외국에서 진행하는 대규모 국제공동연구를 통해 입자물리 실험을 하여온 국내 연구진으로서의 저비용으로 국내에서 중요한 실험을 추진할 수 있는 매우 좋은 기회임에 틀림이 없다. 4년간 검출기 제작을 위해 약 100억 원, 지하시설 구축을 위한 공사비용이 약 50억 원으로서 연간 약 35억 원이 소요되는 프로젝트이다.

### 중성미자 관련 실험에 노벨상 세 번 수상

핵붕괴에서 보존되지 않는 에너지와 운동량을 설명하기 위해 제안된 가상의 입자였던 중성미자는 처음 발견될 때까지도 오랜 세월이 걸렸지만, 워낙 물질과의 상호작용이 미약하여 이 입자의 성질을 파악하는 데도 무척 힘들었다. 관측하기가 힘든 만큼이나 중성미자와 관련된 실험 결과에 이미 세 번의 노벨상이 주어졌고, 최근 중성미자 변환의 발견에 대해서도 노벨상이 기대될 정도로 중성미자의 성질 하나하나가 밝혀질 때마다 학계에 엄청난 파장을 일으켜 왔다.

중성미자의 연구는 여러 흥미로운 발견과 새로운 연구분야의 개척을 이끌어 왔다. 최근 중성미자 변환의 발견은 입자물리학의 표준모형을 벗어난 새로운 물리, 즉 초기우주를 설명하는 대통일 이론을 검증할 수 있는 가능성을 열어 놓았다. 앞으로도 중성미자의 질량을 측정하고자 하는 도전은 끊임없이 진행될 것이다. 중성미자는 우주를 좀 더 깊이 이해하는데 중요한 역할을 담당하게 되리라 예상된다. 이러한 상황에서 국내 연구진이 비교적 적은 비용으로 아직도 측정하지 못한 중요한 중성미자 변환 상수를 측정하려는 세계적 경쟁 대열에 합류하고 있음은 다행스럽고 흥미로운 일이라 하겠다. **ST**



글쓴이는 펜실베이니아대학에서 태양중성미자 관측으로 박사학위를 받았으며, 미시간대학 연구원, 보스턴대학 연구교수를 거쳐 1998년부터 현재까지 서울대 물리학과 교수로 재직하며 주로 중성미자 변환에 대한 연구를 해왔다.