

물리학계의 새로운 혁명 M-이론

‘M-이론’의 등장으로 최근 물리학계에 새로운 혁명이 일고 있다. ‘M-이론’은 지금까지 양자이론으로 설명하지 못했던 많은 문제들을 해결할 수 있는 길을 열었다. 특히 새로운 수학이나 물리학을 창조하고 새로운 논리와 사고방법을 허용하여 새로운 철학을 전개해 줄 것이라고 사람들은 기대하고 있다.

최근 물리학계에 새로운 혁명이 일고 있다. M-이론 혁명이 바로 그것이다. M-이론이란 입자작용을 지배하는 힘들과 중력을 변칙없이 성공적으로 통합하기 위하여 개발된 11차원의 초대칭 중력장론과 10차원 또는 11차원에서 초대 포앙카레 불변성(super Poincaré Invariance)을 만족하는 것들의 전부로 알려진 다섯개의 초대칭 끈이론들을 일관성 있는 양자 기저상태들의 다양형체(Manifold) 또는 한 극한으로 설명할 수 있는 더 큰 총합된 이론이다. 따라서 다섯개의 초대칭 끈이론과 초대칭 중력이론들 사이에는 서로간의 이중성(duality)이 성립된다. M-이론에 의하면 우주의 끝 주변 경계는 공간차원이 9차원 벽 또는 막(brane)이며 삼라만상의 자연현상을 성공적으로 설명한다고 믿는 표준모형(the standard model)의 자유도(degree of freedom)는 실제로 이 고차원 공간의 막 속에 묻혀 있는 한 (3+1)차원 벽 또는 3차원막(3-brane) 위에 거주하고 있다고 한다. 다시 말해서 표준모형의 게이지장은 실제로는 초대칭 중력이론으로 표시되는 우주의



姜慶植
<미 브라운대학 물리학 교수>

끝 부분에 있는 이러한 다차원의 벽 속에 묻혀 있는 것이라고 보는 것이다. 한편 우리가 실제로 인식하고 있는 시간과 공간의 4차원 이외의 여분 공간 차원은 M-이론에서는 super-string의 양자상태가 변천하여 새로운 좌표로 행세하는 것으로 설명하고 있다. holographic원리라고 불리는 이러한 성질 때문에 리만기하(Riemannian geometry)를 써서 4차원 시공의 곡률변환으로 지금까지 설명해온 중력장이론의 대폭적인 수정이 불가피하게 되었다. 특히 4차원 시공 내에서의 변환에 대한 불변성 즉 국소 로렌츠불변성(local Lorentz Invariance)에 바탕을 두고 있는 양자장 표준모형이론이

M-이론의 발견으로 말미암아 이제는 더이상 가장 근본적인 물리학 이론으로 간주될 수 없게 되었다. 때문에 로렌츠불변성이나 이로부터 귀결된 CPT정리가 더이상 신성불가침의 진리라고 볼 수 없으며 따라서 아주 미세하지만 로렌츠불변성이나 CPT정리를 위반하는 지금까지는 상상도 못한 새로운 효과를 연구하는 새로운 물리학이 가능하게 되었다.

새로운 ‘비교환기하학’ 예고

이처럼 M-이론은 현재까지는 발견되지 않은 새로운 수학인 비교환기하학(non commutative geometry)과 새 물리학의 전개를 제시하고 있을 뿐 아니라 M-이론자체가 holographic원리를 합병하고 있는데서 오는 사고방식 때문에 검은 구멍(black hole)우주론이나 철학분야에 이르기까지 혁명적인 변화를 암시해 주고 있는 것이다.

현재까지는 표준모형이론이 바탕을 두고 있는 양자장론이 상대론적인 불변성 즉 로렌츠불변성과 CPT정리를 원칙으로 포함하고 있기 때문에 모든 물리학자들이 이 두가지 원리를 확고하게 믿고 의심하지 못했다. 로렌츠불변성은 자연현상이 일어나고 있는 4차원 시공의 변환에 대하여 자연법칙이 변함없이 동등하게 성립되어야 함을 의미하며 원래는 맥스웰의 전자장이론(Maxwell's electromagnetic field theory)이 만족하고 있는 대칭성에서 착안되었다. 이 대칭성을 질량을 가진 입자의 역학(particle mechanics)에 적용시키는 과정에서 특수상대성이론(special relativity)이 발견되었던 것이다. 따라서 로렌츠불변성은 곧 상대론적 변환에 대한 자연법칙의 불변성을 의미하는 것이다. 다른 한편 M-이

론에서는 그 자체의 양자보정(quantum correction)때문에 상대론적인 동등원리(equivalence principle)가 반드시 성립할 필요가 없으므로 로렌츠 불변성의 위반이 자연스럽게 생길 수 있다.

다른 한편 전하공액변환(charge conjugation)을 표시하는 C, 공간반전(space inversion)하에서의 우기성을 표시하는 P, 그리고 시간가역(time reversal) T를 종합한 불연속적인 CPT대칭성도 표준모형이론이나 양자전자기역학에서는 예외없이 성립되는 정리다. CPT정리에 의하면 물질입자(particle)와 그 반물질입자(antiparticle)의 질량, 수명, 전하대질량비례, 그리고 자기회전비율(gyromagnetic ratio)이 똑같다고 예측해 주는데 현존하는 기술로 측정할 가장 정밀한 실험에 의하면 CPT정리 위반 효과는 10의 20승분의 1(또는 10^{-20})보다 적다고 알려졌으니 아무도 CPT정리를 의심하지 못하고 있는 것이다. 따라서 필자가 인디애나대학교로부터 로렌츠 불변성과 CPT정리위반을 토론하기 위한 CPT98회의 초대를 받았을 때의 반응도 무슨 영똥한 소리들을 하나 하는 정도였던게 사실이다.

우주도 방향을 가지고 있나?

그러나 놀라운 것은 물리학자들 중에서 비록 소수이긴 하지만 집념을 가지고 꾸준히 아주 근본적인 대칭원리의 위반 효과를 생각하고 정밀실험을 통하여 측정해오고 있는 사람들이 있었다는 사실이다. 회의는 물론 잘 알려진 소림자들의 성질로부터 CPT정리를 시험하는 것들로부터 시작했지만 천체물리학의 방법으로 먼 은하계로부터 받은 라디오파 광자의 편광회전 측

정실험 내용을 들었을 때 이것이 바로 작년 4월 뉴욕타임스, AP통신, Time지, Science News 등에서 떠들썩하게 ‘우주에도 위와 아래가 있나?’, ‘이쪽이 뒤라는 말이 우주에도 적용되나?’, ‘우주도 방향을 가지고 있는가?’ 등등의 제목을 붙여서 흥미로운 새 발견 과학기사로 다루어졌던 실험의 내용이었구나 깨닫게 되었다. 이 흥미로운 기사는 힐러리 프라이스(Hilary Price)의 연재만화 오렌지와 같은 운어(Rhymes with Orange)를 통하여 전 세계신문에 게재되어 익살맞은 반응을 일으키기도 했는데 이 만화 속에서 주인공은 비등방성 우주(anisotropic universe)안에 있는 생명이기 때문에 야기되는 실존적인 번뇌를 토로하면서 “나는 우주방향에 대해 거꾸로 서 있더라도 차라리 정신만은 잃지 않고 싶다”라고 말하고 있는 것이다.

이야기는 97년 봄에 발표된 노드랜드와 랄스톤 B. Nodland and J. Ralston, Phys. Rev. Lett. 78, 3043 (1997)의 논문으로부터 시작된다. 이들은 먼 은하계로부터 온 라디오파의 편극과 그 출발체 원점의 방향과의 사이의 각도 측정을 분석하여 광선이 먼 거리 우주공간을 통과 여행하는 사이에 각도가 달라졌다고 주장하면서 우주가 비등방성이라는 증거가 포착되었다고 결론내렸고 따라서 우주공간에도 선택된 방향이 있다고 주장했던 것이다. 이 논문은 스타트랙의 고안자들이 엔터프라이즈 미션에서 상상해놓은대로 지구 밖에도 생명체가 있다는 것을 증명하는 것이라는 주장이나 물의를 일으키는 문제의 사상이 린드 라투스(Lydon LaRouche)가 자기는 오래 전부터 알고 있었던 일이라고 주장하여 우스꽝스러운 희극을 자아내기도

했던 것이다. 그러나 만약 이 논문의 주장이 맞다면 그것은 우주 안에서 라디오파가 진행해오는 사이에 로렌츠 불변성에 반대되는 어떤 영향을 받았다고 해석할 수가 있는 것이다. 왜냐하면 보통의 전자기장이론과 로버트슨 워커메트릭(Robertson-Walker metric)을 가지고 기술하는 우주론에서는 위에서 말한 라디오파의 편극과 그 원천의 방향 사이의 각도들이 지구 상에서 측정해도 은하계 자체 내에서의 값과 동일하게 변하지 말아야 하기 때문이다. 말하자면 M-이론에서 가능한 로렌츠변환에 대한 불변성에 위반되는 효과가 나타난 것이라고 볼 수 있기 때문이다.

표준모형이론의 기초인 게이지 양자장론에서는 게이지 변환에 대한 불변성을 하나의 기본적인 원칙으로 사용하여 이론전개를 시작한다. 이런 결과로 양자전기 역학이나 고전 양자장론에서의 소위 최소원리(Minimal principle)가 자연스럽게 유도되어 나오기도 했던 것이다. 또한 광자(Photon)의 질량항(Mass term)을 전기역학의 기본 라그랑지 밀도식(Lagrangian density)에 합할 수 없는 것도 게이지 변환에 대한 불변으로 이해했다. 그러나 게이지 장론에서는 힉스수단(Higgs mechanism)이라는 교묘하게 저절로 생기는 대칭성 파괴방법으로(Spontaneous symmetry-breaking mechanism)게이지 변환 불변성 위반을 허용해주며 이 과정을 통하여 입자의 질량들이 미약한 힉스 스칼라장(the Higgs scalar field)의 영향으로 생기게 해준다. 힉스 스칼라 입자는 표준모형이론을 만들어주는 기본구조 입자들 중에서 유일하게 아직까지 실험적으로 발견되지 않은 기본입자다.

현대적인 사고방식으로는 엄밀한 의미에서 광자가 반드시 질량이 영일 필요도 없으며 모든 종류의 대칭성도 게이지장론 입장에서 보면 궁극적으로는 이렇게 미묘하게 저절로 생기는 대칭성 파괴과정 때문에 깨진다고 보는 것이다. 이 때문에 광자의 질량을 결정해 보려는 시도가 게이지장론 개발 이후 자연스럽게 생겼다. 로렌츠 변환에 대한 불변성을 만족함에도 불구하고 게이지변환에 대한 불변성을 위반하는 광자 질량항을 허용하면 전자파가 질량항 때문에 왜곡되어서 광속도가 모든 좌표계에서 동일한 상수이어야 하는 상대론적인 동등 원리를 만족하지 않게 되는 효과가 생기므로 은하계의 자장(Galactic magnetic field)을 관측하여 조사해 본 결과 광자의 질량은 3×10^{-36} GeV(또는 5.35×10^{-60} 그램; 전자 질량의 약 10의 33승분의 6)보다 적은 것으로 나타났다. 로렌츠불변성을 위반시키는데는 라그랑지 밀도식에 자기 에너지 항(Magnetic energy term)을 수정하는 방법도 있는데 이런 경우엔 전자기부분의 광속도가 원래의 광속도 C와 다르게 되며 그 외 물질부분에서는 C가 계수로 나타나게 된다. S. Coleman과 S. Glashow는 우주선(Cosmic ray) 실험치를 써서 이런 경우 새로운 항의 크기가 10의 23승분의 1보다 클 수 없다고 결론을 내렸다.

위에서 언급한 은하계로부터의 라디오파의 편극각도 해석문제에 대하여 이미 8년 전에 S. Carroll, G. Field 그리고 R. Jackiw가 같은 실험치를 써서 광이 우주공간을 통하여 여행오는 사이에 생겼을 로렌츠불변성 위반효과는 없다고 결론내린 바 있다. Carroll의 팀은 로렌츠불변성을 위반하는 효

과를 천-폰트리아긴(Chern-Pontryagin) 밀도항을 전자기장 라그랑지 밀도식에 가미해줌으로써 전자장 방정식들이 게이지변환에 대하여는 불변이지만 로렌츠변환 불변성을 위반하도록 하여 전자파의 편극 회전식을 유도해서 실험치와 비교했던 것이다. 이는 전자파의 편극이 주변의 자기장 때문에 변화를 일으킨다는 패러데이효과(Faraday effect)와 매우 흡사한 것인데 다만 편극변화가 파동의 파장에 무관하게 생기는 것이 다를 뿐이다. Carroll팀은 은하계 라디오파의 편극 회전 실험치로부터 광자의 질량이 10의 66승분의 2그램보다 더 적기 때문에 이 질량효과가 실제 측정이 되려면 자기 자신의 콤프톤 파장(Compton wave-length)보다 커야 하는데 이 경우 우주지평선(horizon) 거리보다 더 크기 때문에 광자가 영이 아닌 질량을 가질 수 없고 우주에는 특별한 방향이 있을 수 없다고 결론을 지었던 것이다. 노드랜드와 랄스톤은 아직도 원래의 주장을 고집하고 있지만 대개 전문가들은 그와 같은 로렌츠불변성의 위반 효과가 없는 것으로 의견을 모으고 있다. 그러나 M-이론 때문에 이제는 로렌츠변환 불변성의 위반효과를 정밀 실험을 통하여 측정하려고 하는게 자연스럽게 보이게 된 것은 사실이다.

힉스 스칼라 입자와 초대칭성

위에서 언급한대로 M-이론에선 holographic원리가 성립해서 4차원 시공 이외의 차원이 스스로 생기는데 이는 게이지장 이론에서 입자들의 질량이 미묘한 대칭성 파괴수단에 의하여 생기는 것보다 더욱 신비스러운 출현 현상인 것이다. 몇가지 초대칭 끈 모형이론에서 힉스 스칼라의 기저에너

지 상태가 여분차원의 좌표로 변천하는 것이 알려졌을 뿐 일반적인 이해는 아직도 잘 안되고 있는 형편이지만 힉스 스칼라가 M-이론의 고차원 다양형체와 깊은 관계가 있으리라 믿는 것이다. 어떤 면에서 M-이론에서의 힉스 스칼라의 역할을 게이지 장론에서 미묘한 대칭성 자연파괴수단을 통하여 입자의 질량을 설명한 것보다 더 기본적인이라고 생각할 수 있다. 또한 표준 모형이론과 정밀 전자기 약작용실험을 비교하여 간접적으로 그의 최소의 질량이 130GeV (2.3×10^{-28}) 정도로 추정되었을 뿐 아직도 힉스 스칼라의 직접적인 관측은 안되었다. 또한 초대칭 끈이론이나 M-이론이 내포하고 있는 초대칭성을 직접적으로 입증하는 실험도 없으며 이 두가지 문제는 장차 LEP2나 Tevatron에서의 실험에서의 큰 숙제거리로 남아있다.

또한 holographic 원리는 블랙홀(black hole) 우주학에 새로운 이해를 가져왔다. 보통의 양자장론에서는 자유도의 수가 공간부피와 함께 늘어나지만 블랙홀 우주론에서는 자유도의 최대수를 의미하는 엔트로피(entropy)가 사건 지평선(event horizon)의 면적에 비례하기 때문에 주어진 한공간 부분이 포용할 수 있는 최대의 자유도는 그것을 싸고 있는 표면적에 의하여 결정되는 것이다. 이것은 M-이론에서 4차원 이상의 여분차원이 자체 내에서 출현하는 holographic원리와 일맥 상통하는 것으로 실제로 초대칭 끈이론에서 블랙홀의 엔트로피 계산결과를 보고서 차원 출현원리가 착안되었던 것이기도 하다. M-이론은 새로운 논리와 사고방법을 허용하여 새로운 철학을 전개해주시리라고 많은 사람을 흥분시키고 있다. ④