

입자가속기와 표준모형¹⁾

— 관련 물리학 논문의 출처 조사를 중심으로

김 종 일
전북대학교 과학학과

Particle Accelerators and the Standard Model

KIM, Chong-Yeal
Department of Science Studies, Chonbuk National University

Abstract

This article reviews the contribution of particle accelerators to the establishment of the so-called standard model in particle physics which describes the fundamental building blocks of matter (quarks, leptons, and gauge bosons), along with the advance of theoretical understanding about elementary particles. A particular attention is paid to introduce the original publications relevant to the theoretical progress or experimental findings of interest.

1. 서 문

인간이 지닌 원초적인 호기심 중의 하나로 물질세계의 본질에 관한 의문을 꼽을 수 있겠다. 그리스의 자연철학자 데모크리토스(Demokritos)가 이 세상의 모든 물질은 더 이상 분할될 수 없는 불가분자(atomos)로 이루어져 있다는 원자론에 기초한 유물론적 기계론을 주창하고,²⁾ 19세기초 달톤(John Dalton)에 의해 근대적 의미의 원자론이 부활한 이후,³⁾ 오늘날까지 과학자들은 물질의 근원을 찾아 많은 노력을 경주해 왔다. 항상 이 대열의 선봉에 서있던 물리학자들은 현재 표준모형(the standard

1) 이 연구는 전북대학교 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

2) *ατομος*(atomos), 'α'는 부정을 나타내는 접두사이고, 'τομος'는 '분할하다'라는 의미를 가진 단어이다.

3) John Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, 2 vols. in 3 (Manchester: S. Russel, 1808).

model)을 이 의문에 대한 가능한 해답으로 제시하고 있다.

이 글은 표준모형이 오늘날 물리학에서 신뢰받는 이론으로 자리잡기까지의 여정을 입자가속기의 발전과 공헌을 중심으로 돌아보고, 이와 관련되어 중요한 업적을 남긴 물리학 분야의 논문들을 찾아 정리하는 것을 목적으로 한다. 그러므로, 이 글은 입자가속기(이하 가속기)의 발전과 함께, 20세기 물리학의 꽃이라 할 수 있는 입자물리학의 역사를 간략히 정리한 글로도 볼 수 있다. 20세기 입자물리학의 핵심이 표준모형이고, 표준모형의 정립에 가장 중요한 역할을 해온 실험장치가 입자가속기이기 때문이다. 이 글은 크게 가속기와 표준모형이라는 두 가지 주제를 다루고 있다. 먼저, 지금까지 건설된 세계의 주요 가속기의 발전 및 변천 과정을 돌아보면서, 주요한 가속기가 발견한 중요한 입자들과 물리적 사실들을 가속기 별로 간략히 살펴보고, 그러한 발견이 발표된 물리학 논문의 출처를 찾아 소개한다. 다음, 표준모형이 정립되는 과정을 가속기의 공헌을 중심으로 살펴보고, 역시 역사적 전환점이 되었던 주요한 실험적 발견과 이론적 진전이 보고된 논문의 출처를 찾아 정리하고 있다.

먼저 이와 같은 글을 쓰게 된 배경을 설명하는 것이 이 글의 전체적인 구조와 내용을 소개하는데 도움이 될 것 같다. 처음의 의도는 현재까지 입자물리학의 내적 발전을 간략하게나마 역사적 측면에서 정리해 보는 것이었다. 20세기의 입자물리학이 과학의 역사에 있어 가장 흥미로운 무대임에도 불구하고, 국내에서는 이 분야에 관한 관심이 아직까지 충분히 성숙되지 못한 단계로 보인다. 따라서, 20세기 입자물리학의 전체적인 내적 발전의 줄거리와 함께, 연구방향의 이정표가 되었던 중요한 이론과 실험적 발견을 소개하고, 그러한 연구결과가 발표된 학술지의 출처를 밝혀주는 작업이 이루어진다면, 향후에 이루어질 이 분야에 관한 연구에 도움이 될 수 있으리라 생각했다.

물론 이와 관련된 주제를 다루고 있는 글은 많이 찾아볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 이 글을 쓰기로 한 것은 이 분야의 글들의 수준에 심각한 과리가 존재하기 때문이다. 비전문가를 대상으로 하는 교양서는 정도의 차이는 있으나 피상적인 수준에 머무는 경우가 많은 반면에,⁴⁾ 전문학술서나 논문은 고에너지 물리학 분야의 전문가가 아니고서는 접근하기가 매우 어려운 것이 현실이다.⁵⁾ 물론 고도로 전문화된 현대과학을 쉽게 소개하는 것은 지난한 작업이다. 사실 극도로 전문화되고 세분화된 현대 과학은 전문가들 사이의 대화조차도 극히 제한된 영역에 국한시키고 있는 것이 현실이다. 하지만, 20세기 후반의 입자물리학이 과학사의 흥미로운 주제로 부상하고 있는 현실점을 고려하면, 전문가와 비전문가 사이의 교량역할을 할 수 있는 글이 필요하다 하겠다. 특히 이 분야가 다른 분야에 비해 비전문가들이 접근하기 어려운 영역이므로, 향후 이 분야의 연구를 활성화하기 위해서는 그러한 바탕작업이 반드시 필요하다고 할 수 있다. 이러한 작업은 과학사를 연구하는 사람들에게는 특별한 의미를 가진다. 과학의 내적 발전에 관한 충실한 이해가 결여된 과학사는 공허하기 때문이다.

이 글에 소개된 내용 자체는 이미 발표된 다른 글들과 본질적으로 다른 내용을 담고 있지는 않다. 이 글은 위의 두 가지 주제, 즉 입자가속기 그리고 표준모형과 관련된 내용을 평이한 수준에서 간략히 논의하면서, 역사적 전환점이 되었던 중요한 이론과 실험적 발견이 발표된 물리학 논문의 출처를 조사하여 각주로 정리하는 작업에 주안점을 두고 있다. 과학사의 내적 연구를 위해서는 관심이 있는 분야에서 이미 이루어진 연구를 살펴보는 것이 우선 이겠지만, 보다 심층적인 연구를 위해서는 그 분야의 과학적 진전이 처음 보고된 논문을 직접 접하는 것이 필수적이다. 이는 세밀한 연구에 도움이 되는

4) 예를 들면, Leon M. Lederman and David N. Schramm, *From Quarks to the Cosmos: Tools of Discovery*, (New York: Scientific American Library, 1989), Harald Fritzsch, *Quarks*, (New York: Basic Books, 1983).

5) 예를 들면, Laurie M. Brown, Max Dresden, Lillian Hoddeson, eds. *New York, Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s. Based on Fermilab Symposium*, (New York: Cambridge University Press, 1989). Andrew Pickering, *Constructing Quarks*, (Edinburgh: Edinburgh University Press, 1984).

것은 물론, 그 논문에 인용된 논문들을 역추적 함으로써 과학발전의 역사적 전개과정을 쉽게 파악할 수 있게 해준다. 하지만, 전문가가 아니면 그러한 논문을 개별적으로 찾아내기가 쉬운 일은 아니다. 따라서, 전체적인 역사적 전개과정을 정리하면서, 중요한 이론적 진보나 실험적 발견이 처음 보고된 연구논문들을 일대일로 대응시킨 형태의 글이 만들어진다면, 이 분야 연구의 활성화에 적게나마 도움이 될 수 있을 것으로 보았다. 특히, 입자물리학 분야의 연구는 새로이 개척되고 있는 분야이므로 이러한 형태의 글이 필요하다고 생각된다. 그러나 아쉽게도 그러한 형태의 글을 찾아보기 어렵다는 사실이 이 작업에 착수하게 된 직접적인 배경이다.

그러나 20세기 후반의 입자물리학의 발전사를 한정된 분량으로 기술하는 것은 불가능한 작업에 가깝고, 분명히 저자의 능력을 넘어서는 일이다. 따라서, 입자물리학의 전체적인 발전과정을 충분히 반영하면서도 한정된 분량으로 기술이 가능하도록, 특정한 이론적, 실험적 대상에 논의를 한정하기로 했다. 입자물리학의 궁극적인 목표 중 하나는 물질의 근본구조를 밝히는 것이며, 표준모형은 현재 물리학자들이 제시하고 있는 해답으로 지금까지 물리학자들이 기울인 노력의 결실이라 할 수 있다. 따라서, 표준모형이 정립되는 과정을 살펴보는 것이 20세기 입자물리학의 전체적인 발전과정을 적절히 기술하는 방법일 수 있다고 보았다. 또한, 입자물리학의 발전은 거의 전적으로 가속기에 의존해 왔으며, 표준모형도 역시 예외가 아니었다. 따라서, 가속기라는 실험적 도구의 발전과 함께, 이를 이용한 발견을 통해서 표준모형을 정립되고 확인되는 과정을 살펴보는 것이 20세기 입자물리학의 전체적인 발전과정을 가장 총체적으로 조명할 수 있는 방법으로 보았다.

이 글은 다음과 같이 구성되어 있다. 서문에 이은 두 번째 절에서는 먼저 표준모형을 정리한다. 다음의 세 번째 절은 1950년대 중반까지 가속기와 무관하게 발견된 아원자 입자들에 대해 간략히 살펴본다. 네 번째 절은 지금까지 세계적으로 제작된 가속기의 변천 및 발전과정을 살펴보면서, 주요한 가속기가 발견한 주요한 입자들과 물리학적 사실에 대해 정리한다. 다섯 번째 절은 표준모형이 정립되고 그 정당성이 확인되는 과정을 네 번째 절에서 정리한 가속기를 이용한 발견을 중심으로 살펴본다. 마지막 절은 앞 절에서의 논의를 정리하고 있다.

마지막으로 한 가지 따로 언급이 필요한 것이 있다. 이 글에서 연구결과와 관련되어 등장하는 모든 연도는, 특별한 설명이 없는 한, 연구결과가 전문 학술지를 통해 공식적으로 출판된 연도를 기준으로 한다. 따라서, 연구업적이 실제로 이루어진 연도와는 다를 수 있다는 것을 밝혀 둔다.

2. 표준모형

먼저 물리학에서 입자를 구분하는 방법에 대해 살펴보자. 입자는 어떤 힘을 통해서 상호작용 하는냐에 따라 강입자(hadron)와 경입자(lepton)로 나뉜다. 강입자는 강력(strong force)의 영향을 받는 입자를 총칭하는 이름으로, 중입자(baryon)와 중간자(meson)로 나뉜다. 반면에 경입자는 강력을 느끼지 못하고 전자기력(electromagnetic force)과 약력(weak force)의 영향을 받는 입자를 말한다.

현재까지 실험적으로 확인된 사실에만 따르면, 양성자를 제외한 모든 강입자는 수명이 유한하여 결국 다른 입자들로 붕괴한다. 이들이 모두 붕괴하고 나면, 최후에 남는 입자는 단지 전자, 양전자, 중성미자, 그리고 빛(광자) 뿐이다. 또 통일장 이론에 의하면, 양성자의 수명이 길기는 하지만 이도 결국은 붕괴할 것으로 예측하고 있다. 또 하나 흥미로운 사실이 있다. 경입자는 전자(e), 뮤온(μ), 타우온(τ), 그리고 이들과 연관된 3개의 중성미자들, 즉 전자중성미자(ν_e), 뮤온중성미자(ν_μ), 그리고 타

우중성미자(ν) 모두 6개가 알려져 있는데, 뮤온과 타우온은 결국 전자와 중성미자로 붕괴한다는 사실이다. 또 현재 실험적으로는 명확히 확인되지는 않았지만, 만약 중성미자들이 질량을 가지고 있다면 뮤온중성미자와 타우중성미자는 전자중성미자로 붕괴할 확률이 높다. 말하자면, 지금까지 알려진 모든 입자는 결국 전자, 양전자, 전자중성미자, 그리고 빛을 남기고 사라질 수 있다는 것이다. 그렇다면, 모든 물질은 결국 위의 네 가지 종류의 입자로 구성되어 있는가. 물론 그렇지 않다.

항상 그렇듯이 물리학의 논리는 간단하다. 입자들과 이들 사이의 상호작용을 분리하면 문제는 쉽게 풀린다. 예를 들면, 강입자 중 하나인 중성 파이온(π^0)은 두 줄기의 빛을 내면서 사라진다.⁶⁾ 물리학에서는 이 현상을 이렇게 해석한다. 먼저, 중성 파이온은 같은 종류의 쿼크와 반쿼크 쌍으로 구성되어 있다고 본다. 파이온의 붕괴는 두 쿼크 사이에 존재하는 전자기 상호작용에 의해서 서로가 소멸되면서 두 쿼크가 가지고 있던 에너지와 운동량을 두 개의 광자가 나누어 가지고 방출된다고 해석한다. 만약에, 쿼크와 반쿼크 사이에 전자기적인 상호작용이 존재하지 않는다면, 중성 파이온은 절대로 두 줄기의 빛으로 붕괴할 수 없다. 즉, 파이온을 구성하는 것은 쿼크이며, 그들의 상호작용에 의해 파이온이 다른 입자로 붕괴한다는 것이다.

표준모형은 어떤 입자가 근본입자이고, 또 어떤 상호작용에 의해 그들 사이에 변환이 일어나는지를 설명해주는 모형이다. 물리학에서 상호작용은 입자의 교환에 의해 일어나는 것으로 설명하고 있으므로, 표준모형은 근본입자와 상호작용을 전달해주는 입자, 즉 게이지 보손(gauge boson)에 관한 모형이다.

표준모형에 의하면 근본입자는 모두 12개, 게이지 보손은 모두 13개이다. 먼저, 강입자는 모두 6종류(flavor)의 쿼크(quark)의 조합으로 설명되는데, 그들 각각에는 u(up), d(down), s(strange), c(charm), b(bottom 또는 beauty), t(top 또는 truth)라는 이름이 붙여져 있다. 양성자와 중성자 같은 중입자는 이들 중 세 개의 쿼크(qqq), 그리고 파이온 같은 중간자는 쿼크와 반쿼크의 쌍($q\bar{q}$)으로 이루어져 있다. 앞서 언급한 6개의 경입자는 모두가 근본입자들이다. 즉, 세상의 모든 물질은 6 종류의 쿼크와 6 종류의 경입자로 구성되어 있다고 보고 있다. 입자들 사이에서 힘을 전달해주는 13개의 게이지 보손은 다음과 같이 정리된다. 중력은 하나의 중력자(graviton)에 의해 전달되고, 전자기력은 가상광자(virtual photon), 약력은 W^+ , Z^0 의 세 가지 입자, 그리고 강력은 8개의 글루온(gluon)에 의해 전달된다. 물론, 여기서 언급한 모든 입자들은 자신의 반입자를 가지고 있다.

물리학자들은 쿼크와 경입자들 사이에 어떤 대칭관계가 존재한다고 생각하고 있다. 쿼크와 경입자의 수가 모두 6개인 것이 우연이 아닐 것이라는 이야기이다. 이 생각이 어떤 궁극적인 원칙에 의존하는 것은 아니지만, 그럴 가능성이 농후한 것으로 여겨지고 있다. 또, 모든 쿼크들과 경입자들이 모두 대등한 것이 아니고, 특별히 밀접한 관계를 가진 쌍으로 구분된다. 예를 들면, 약력에 의해 어떤 입자가 베타붕괴할 때, 항상 전자와 전자중성미자, 뮤온과 뮤온중성미자, 또는 타우온과 타우중성미자가 짝을 이루어 방출된다. 이를 고려하여, 경입자는 (e, ν_e) , (μ, ν_μ) , (τ, ν_τ) 의 3 쌍으로 구분된다. 경입자의 쌍과 비슷하게 6개의 쿼크도 서로 다른 쿼크의 3개의 쌍, 즉 (d, u) , (c, s) 그리고 (t, b) 쌍으로 구분한다. 그리고 경입자의 쌍과 쿼크의 쌍 사이에는 서로 특별히 연관된 대칭관계가 있다고 생각하는 데, 그런 관계에 있는 경입자 쌍과 쿼크의 쌍이 모여 한 세대(generation)를 이룬다고 보고 있다. 세대의 개념은, 다음에 살펴보겠지만, 표준모형의 발전과정에서 매우 중요한 역할을 담당했다. 세대에 대한 이해를 돕기 위해 중성자의 베타붕괴를 살펴보도록 하자.

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

사실 이 반응은 중성자(udd) 안에 포함된 d-쿼크 하나가 u-쿼크로 변환되면서 전자와 전자중성미자가 방출되는 반응이다.

$$d \rightarrow u + e + \bar{\nu}_e.$$

간단히 말하면, 이 반응을 (e, ν_e)와 (d, u)가 한 세대를 이루는 증거로 생각하고 있다. 이와 비슷하게 c-쿼크는 약상호작용을 통해 95%의 확률로 s-쿼크로 붕괴하면서 μ 와 ν_μ 가 방출되는데, 이는 또 (c, s)와 (μ, ν_μ)가 한 세대를 이루기 때문으로 생각하고 있다. t-쿼크와 b-쿼크도 이와 유사하게 τ 와 ν_τ 와 연관된다. 이를 정리하면 쿼크와 경입자는 다음과 같은 3 세대의 쌍으로 정리된다.

제 1 세대	$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} d \\ u \end{pmatrix}$
제 2 세대	$\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$
제 3 세대	$\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

이 밖에 표준모형과 관련되어 필요한 내용은 앞으로 필요한 경우에 보충하기로 한다.

3. 가속기와 무관하게 발견된 아원자 입자들

가속기가 처음 등장한 것은 1930년대 초반의 일이다. 1931년 미국의 버클리에서 로렌스(Ernest Lawrence)와 리빙스톤(Stanley Livingston)이 세계 최초의 가속기인 사이클로트론(cyclotron)을 제작했고, 다음 해인 1932년 영국의 캐번디쉬(Cavendish) 연구소에서는 코크로프트(John Cockcroft)와 월튼(Ernest Walton)이 전압증폭장치와 변압기를 이용한 양성자 가속장치를 개발하여 인공핵변환의 연구에 사용했다. 하지만, 초창기 가속기들은 주로 인공핵변환을 통해 원자핵의 성질을 연구하는데 이용되었으므로, 엄밀히 말하자면 오늘날 우리가 알고 있는 의미의 입자물리학에 응용되었다고 볼 수는 없다. 다음절에서 살펴보겠지만, 가속기가 발견한 최초의 소립자, 즉 파이온(π^+)이 관측된 것은 1949년이였다.⁷⁾ 또한 입자물리학이란 용어가 일반화된 것도 가속기의 건설이 궤도에 오른 1950년대 중반이므로, 1950년대 이전의 입자물리학의 발전은 가속기와 거의 무관하게 이루어 졌다고 말할 수 있다. 하지만, 입자물리학의 뿌리는 톰슨이 전자를 발견한 1897년까지 거슬러 올라간다. 가속기를 사용하지는 않았지만, 1950년대 이전에 이미 상당한 수의 아원자 입자들(subatomic particles)이 발견되었다.

가속기가 등장하기 전에 입자 발견에 사용되었던 실험도구는 주로 방사선과 우주선이였다. 그리고 전위계(electrometer), 가이거 계수기(Geiger counter), 안개상자(cloud chamber),⁸⁾ 사진감광

7) J. Burken, E. Gardner, and C. M. G. Lattes, "Positive Mesons Produced by the 184-inch Berkeley Cyclotron," *Phys. Rev.* 75 (1949) 382.

8) C. T. R. Wilson, "On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionizing Particles in Gases and Some Results Obtained by Its Use," *Proc. Roy. Soc. A* 87 (1912) 277. C. T. R. Wilson, "Investigations on X Rays and β Rays

(photographic emulsion) 등 입자의 존재를 검출하고 궤적을 추적할 수 있는 실험장치의 발전도 중요한 역할을 했다.

먼저, 1950년대 이전에 방사선과 우주선을 이용해서 얻은 근본입자의 연구와 관련된 연구성과를 간략히 살펴보자. 방사선을 이용한 연구를 통해 원자핵의 존재가 밝혀지고,⁹⁾ 양성자와 중성자가 발견되어, 원자는 전자와 원자핵으로 구성되어 있으며, 원자핵은 양성자와 중성자로 구성되어 있다는 사실이 밝혀졌다.¹⁰⁾ 한편, 우주선 연구는 자연적으로 존재하지 않는 여러 입자들의 발견에 공헌을 했다. 양전자(positron)의 발견에 이어 뮤온(muon)과 파이온(pion), 그리고 케이온(kaon)과 람다(lambda) 입자 등 V-입자들이 그것들이다. 표1은 가속기와 무관하게 발견된 입자들과 발견자들을 정리한 것이다.

표-1. 가속기와 무관하게 발견된 입자들과 발견자들

- 1897 : 전자(e^-): J. J. Thomson¹¹⁾
- 1919 : 양성자(p): Ernest Rutherford¹²⁾
- 1932 : 중성자(n): James Chadwick¹³⁾
- 1932 : 양전자(e^+): Carl Anderson¹⁴⁾
- 1936 : 뮤온(μ): Carl Anderson¹⁵⁾
- 1947 : 하전 파이온(π^+): Giuseppe Occhialini와 Cecil Powell¹⁶⁾
- 1947 : 케이온(K^+ , K^0): George Rochester와 Clifford Butler¹⁷⁾
- 1951 : 람다(Λ): Clifford Butler 팀¹⁸⁾
- 1952 : 음성 사이(Ξ^-): R. Armenteros 팀¹⁹⁾
- 1953 : 양성 시그마(Σ^+): A. Bonetti 팀²⁰⁾과 C. M. York 팀²¹⁾

by the Cloud Method. Part I. - X Rays," *Proc. Roy. Soc.* A104 (1923) 1.

9) Ernest Rutherford, "The Scattering of α Particles by Matter and the Structure of the Atom," *Phil. Mag.* 6 (1911) 699.

10) Werner Karl Heisenberg, "On the Structure of Atomic Nuclei I," *Z. Phys.* 77 (1932) 1.

11) J. J. Thomson, "Cathode Rays," *Phil. Mag.* 44 (1897) 293, *Nature* 55 (1897) 453.

12) Ernest Rutherford, "Collision of α -particles with Light Atoms IV. An Anomalous Effect in Nitrogen," *Phil. Mag.* 57 (1919) 581.

13) James Chadwick, "Possible Existence of Neutron," *Nature* 129 (1932) 312.

14) Carl Anderson, "The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives," *Science* 76 (1932) 238, Carl D. Anderson, "The Positive Electron," *Phys. Rev.* 43 (1933) 491.

15) Seth H. Neddermeyer and Carl D. Anderson, "Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles," *Phys. Rev.* 51 (1937) 884.

16) G. P. S. Occhialini and Cecil F. Powell, "Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass," *Nature* 159 (1947) 186.

17) George D. Rochester and Clifford C. Butler, "Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles," *Nature* 160 (1947) 885.

18) R. Armenteros, K. H. Barker, C. C. Butler, A. Cachon, "The Properties of Neutral V-Particles," *Phil. Mag.* 42 (1951) 1113, R. Armenteros et al., "Decay of V-Particles," *Nature* 167 (1951) 501.

19) R. Armenteros et al., "The Properties of Charged V-Particles," *Phil. Mag.* 43 (1952) 597.

20) A. Bonetti, R. Levi-Setti, M. Panetti, G. Tomasini, "On the Existence of Unstable Charged Particles of Hyperonic Mass," *Nuovo Cim.* 10 (1953) 1736.

21) C. M. York, R. B. Leighton, E. K. Bjornenud, "Direct Experimental Evidence for the Existence of a Heavy V-Particle," *Phys. Rev.* 90 (1953) 167.

1950년대 초반은 입자물리학의 연구가 우주선에서 가속기로 이전되는 전환기였으며, 1950년대 중반부터는 사실상 대부분의 연구가 가속기에 의해 독점되기 시작했다. 앞에서 언급한 K , Λ , Ξ , Σ 이외의 기묘한 입자들 Ξ^0 , Σ^0 , Σ^+ 등은 모두 가속기에서 검출되었는데, 가속기가 물리학 연구에 가세하면서 입자물리학은 비약적으로 발전했다.

가속기 이전의 연구로 물질관에 나타난 변화는 다음 두 가지로 요약될 수 있다. 하나는 방사선을 이용한 연구, 다른 하나는 우주선의 연구에서 나타났다. 1930년대 초반까지 방사선을 이용한 연구를 통해 그 동안 원자가 차지해 왔던 위치를 전자와 핵자가 대신하게 되었다. 하지만, 물리학자들의 전통적인 기계론적 자연관에 근본적인 변화를 가져오지는 못했다. 다시 말해, 원자의 개념이 한 단계 하위 구성원으로 재편되기는 했지만, 원자론 자체에 대한 의문은 등장하지 않았다. 하지만, 우주선의 연구는 기존의 원자론에 기초한 유물론적 기계론에 의문을 제기하고, 유기론적 또는 통합적인 물질관을 등장시키는 계기가 되었다. 표 1에 정리된 것과 같이 1950년대 초반까지 발견된 입자의 수는 10여 개에 불과했다. 이 숫자도 매우 혼란스럽기는 했지만, 가속기가 이용되면서 입자의 수를 세는 것이 무의미할 정도로 많은 입자들이 발견되었고, 그 결과 물리학자들은 물질의 근본에 관한 심각한 의문에 봉착하게 되었다. 먼저, 이들 모두가 근본입자이나 하는 문제였다. 원자론자들은 이들이 모두 근본입자는 아니며 이들을 설명할 수 있는 한 단계 하위 구성입자가 있을 것이라 생각했던 반면에, 이들을 모두 근본입자라 생각했던 사람들은 이제 근본입자라는 개념은 무의미하며, 개개 입자들 자체보다 입자들 사이의 변환, 즉 유기적인 관계에서 의미를 찾아야 한다고 보았다. 예를 들면, 빛은 전자와 양전자로 붕괴하고, 전자와 양전자는 서로 소멸되어 빛이 된다. 이러한 상황에서, 빛, 전자, 양전자 어느 것을 근본 입자라 생각하는 것은 무의미하다는 것이다. 이들 입자들을 모두 동등한 자격, 다시 말해 동등한 물질의 상태로 간주하고, 이들 사이의 유기적 연관성에 더 비중을 두어야 한다는 것이 그들의 생각이었다. 파인만(Richard Feynman)도 한 때 그러한 견해에 동조했다. 그는 완벽한 물질이론이 갖추어야 할 조건으로, 어떤 입자가 근본입자라고 말할 수 없는, 모든 입자를 포함하는 닫힌 관계(closed relation)를 지적했다.

그러나, 1964년에 있었던 Ω 의 발견과 쿼크모형의 등장은 다시 한번 원자론자들의 손을 들어주는 사건으로, 오늘날 표준모형으로 일컫는 물질의 근본구조에 관한 모형이 등장하게 된 시발점이 되었다.

4. 입자가속기²²⁾

여기에서는 가속기의 전반적인 발전과정과 함께, 가속기가 발견한 주요한 실험적 사실들을 가속기의 유형 별로 살펴보고, 그들이 발표된 연구논문들을 정리하도록 한다.

가속기가 물리학의 연구에 처음으로 이용된 곳은 1932년 러더포드가 소장으로 있었던 영국의 캐번디쉬 연구소였다. 러더포드는 1927년 영국의 왕립학회에서 행한 회장연설에서, 입자를 원하는 만큼의 에너지로 가속시켜 핵과 충돌시킬 수 있는 입자가속장치가 개발된다면, 원자핵의 연구에 매우 유용할 것이라는 말을 남겼다.²³⁾ 알파입자를 이용해서 원자핵과 관련된 여러 중요한 업적을 이룬 그는,

22) 현존하는 입자가속기에 관련된 주요 정보는 다음의 인터넷 사이트에서 찾을 수 있다.

http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html

핵과 핵자의 성질을 연구하기 위해서는 방사성 물질에서 나오는 알파입자보다 높은 에너지를 가진 입자가 필요하고, 또 정량적인 연구를 위해서는 표적에 입사되는 입자의 에너지를 정확히 조절할 수 있어야 한다는 것을 잘 알고 있었다. 그러나, 그는 가속기의 제작에는 반대했다.²⁴⁾ 장난감 같은 실험장치에 익숙해 있었던 그에게는 가속기가 다분히 사치스러운 실험장치로 여겨졌기 때문이었다.²⁵⁾ 러더포드의 반대에도 불구하고, 캐번디쉬 연구소의 코크로프트와 월튼은 가속기를 제작하여 1932년 역사상 최초로 인공적인 입자 충돌실험에 성공했다. 일이 그렇게 된 것은 당시 세계적으로 여러 산업분야에서 고전압 발생장치를 필요로 했고, 캐번디쉬 연구소도 그것의 개발에 동참했기 때문이었다. 오늘날 보다 높은 에너지의 입자가속기를 향한 경쟁이 한창인 것처럼, 당시에는 보다 높은 전압의 발전기를 목표로 경쟁이 치열하게 벌어지고 있었다. 당시에 고전압 발생장치의 개발이 관심거리로 부상했던 이유는 입자를 가속시키려는 목적도 있었지만, 주로 송전 중에 전력손실을 줄이기 위해 가능하면 고전압으로 전기를 발전해야 할 필요성, 송배전과 관련된 전기제품들이 낙뢰와 같은 고전압에 견딜 수 있는지의 시험, 그리고 의료용 X-선 발생장치의 제작 등에 필요했기 때문이었다.²⁶⁾ 코크로프트와 월튼은 양성자를 800keV까지 가속시킬 수 있었던 이 장치를 이용하여 최초의 인공핵변환²⁷⁾에 성공했다.²⁸⁾ 이는 최초의 인공핵변환이라는 의미와 함께, 가모브(George Gamow)가 계산했던 양자투과현상을 실험적으로 입증했다는 의미도 가지고 있었다.²⁹⁾

비록 실제로 연구에 응용되지는 않았지만, 세계 최초의 가속기는 1년 전인 1931년에 로렌스와 리빙스턴이 개발한 사이클로트론(cyclotron)이었다.³⁰⁾ 사이클로트론은 캐번디쉬의 가속기보다 한 차원 앞선 가속기였다. 캐번디쉬의 가속기는 변압기와 전압증폭회로를 이용한 원시적 형태의 가속기였던 반면에, 사이클로트론은 상대적으로 낮은 전압의 고주파를 이용해서 하전입자를 반복해서 가속시키는 세련된 방법을 사용했다. 최초의 사이클로트론은 양성자를 80keV까지 가속시킬 수 있었으나,³¹⁾ 1년 후인 1932년에는 1MeV까지 가속이 가능했다.³²⁾ 하지만 당시에 이들은 가속기를 연구에 응용하는 것보다, 가속기의 성능을 향상시키는 작업에 더 많은 비중을 두고 있었기 때문에 물리학에 공헌한 바는 거의 없다. 그들이 만든 사이클로트론의 가속능력은 5.0MeV(1934), 8.0MeV(1936), 20MeV(1939), 200MeV(1946) 등으로 계속 향상되었으며, 이와 함께 직경도 11인치(1932), 27인치(1934), 37인치(1936), 60인치(1939), 그리고 184인치(1946)로 커져 갔다.

23) Frank Close, Michael Marten, Christine Sutton, *The Particle Explosion*, (New York: Oxford University Press, 1987) p. 106.

24) 중성자를 발견한 채드윅(James Chadwick)은 가속기의 제작에 관심이 높았으나 러더포드의 반대로 뜻을 이루기 어렵자, 캐번디쉬연구소를 떠나 리버풀(Liverpool)로 자리를 옮겨 그곳에서 사이클로트론의 개발에 참여했다.

25) Goldon Fraser, *The Quark Machines: How Europe Fought the Particle Physics War*, (Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1997).

26) M. Stanley Livingston, *Particle Accelerators: A Brief History*, (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1969).

27) $p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2\alpha$.

28) J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, "Disintegration of Lithium by Swift Protons," *Nature*, 129 (1932) 649.

29) George Gamow, "On Quantum Theory of Atomic Nuclei," *Z. Phys.* 51 (1928) 204.

30) E. O. Lawrence and M. S. Livingston, "A Method for Producing High Speed Hydrogen Ions without the Use of High Voltages," *Phys. Rev.* 37 (1931) 1707.

31) E. O. Lawrence and M. S. Livingston, "The Production of High Speed Protons without the Use of High Voltages," *Phys. Rev.* 38 (1931) 834.

32) E. O. Lawrence and M. S. Livingston, "The Production of High Speed Light Ions without the Use of High Voltages," *Phys. Rev.* 40 (1932) 19.

현재 존재하는 대부분의 가속기는 싱크로트론(synchrotron)인데, 이는 싸이클로트론을 개량한 것이다. 하지만, 이들이 입자를 가속시키는 방법은 기본적으로 동일하다. 오늘날의 가속기를 가능케 한 사람은 고전압을 사용하지 않고 하전입자를 가속시키는 방법을 처음으로 착안한 노르웨이 사람인 비데로(Rolf Wideröe)였다. 그는 박사학위 논문에서 교류전압의 주파수를 조절하여 하전입자를 반복해서 가속시키는 방법을 착안하고 이에 관한 특허를 출원했다. 싸이클로트론은 로렌스가 비데로의 아이디어에 자기장 안에서의 하전입자의 행동을 결합시켜 탄생한 것이다.

싸이클로트론은 싱크로싸이클로트론(synchrocyclotron)을 거쳐 싱크로트론으로 개량되었다. 싱크로싸이클로트론은 입자의 운동속도가 빨라지면서 나타나는 상대론적 효과에 따른 문제점을 해결한 가속기이다. 입자의 속도가 증가하면 입자의 질량도 증가하는 까닭에, 입자의 회전주기가 서서히 늦어진다. 서서히 늦어지는 회전주기에 맞추어 전압의 주파수를 조절해주는 가속기가 싱크로싸이클로트론이다. 이 장치의 원리는 1944년과 1945년에 각각 벅슬러(Vladimir I. Veckler)³³⁾와 맥밀란(Edwin M. McMillan)³⁴⁾에 의해 독립적으로 착안되었다. 한편, 싸이클로트론과 싱크로싸이클로트론 모두 입자가 가속되면서 회전반경이 커지는 나선운동을 하는 단점을 가지고 있었다. 따라서 입자의 에너지를 높이기 위해서는 싱크로싸이클로트론의 반경이 계속 커져야만 했다. 싱크로트론은 이 같은 단점을 보완한 원형가속기이다. 즉, 입자의 에너지가 증가하면 이에 맞추어 자기장의 세기를 증가시킴으로써, 입자의 회전반경을 일정하게 유지하면서 입자를 가속시키는 장치이다. 싱크로트론의 원리는 1946년 맥밀란에 의해 고안되었다.³⁵⁾

로렌스의 발명 이후 가속기는 눈부신 발전을 거듭했다. 양성자 가속기를 살펴보면, 직경 약 27cm, 에너지 80keV에 불과했던 로렌스의 첫 번째 가속기는 현재 직경이 약 3.2km, 에너지가 1 TeV에 달하는 거대한 장치로 발전했다. 페르미연구소의 테바트론(tevatron)이 그것이다. 나아가, 전자-반전자 충돌가속기인 CERN의 LEP(Large Electron Positron collider)의 둘레는 27km에 달한다. 이러한 거대한 가속기의 등장은 과학에 대한 공적 지원의 확대가 가장 큰 요인인 것은 사실이지만, 이에 더하여 물리학적 의문의 대상 그리고 다양한 기술적인 발전 또한 가속기의 진화에 크게 기여하였다. 여기서는 가속기의 발전과정과 이를 통한 주요한 발견 중에서 표준모형의 정립과 밀접히 연관된 것들을 위주로 간추려 본다.

전개상의 편의를 위해 먼저 가속기를 다음과 같은 네 가지 유형으로 분류하고, 이들의 발전 과정을 독립적으로 살펴보기로 한다. 가속기는 가속되는 입자의 종류와 가속된 입자를 표적입자(target particle)와 충돌시키는 방법에 따라 구분되는 것이 일반적이다. 가속되는 입자는 주로 양성자와 전자이며, 충돌시키는 방법에 따라 표적입자를 고정시켜 놓은 고정표적 가속기(fixed target accelerator)와 입자들을 서로 반대방향으로 입사시켜 충돌시키는 충돌가속기(collider)로 나뉘어 진다. 따라서, 이 글에서는 가속기를 양성자 고정표적 가속기, 전자 고정표적 가속기, 전자 충돌가속기, 그리고 양성자 충돌가속기의 순서로 발전과정을 정리한다. 위의 순서는 각기 이들이 누렸던 전성기의 순서와도 같다.

33) V. I. Veckler, "A New Method of the Acceleration of Relativistic Particles," *Doklady, Akad. Nauk SSSR* 43 (1944) 346.

34) E. M. McMillan, "The Synchrotron - A Proposed High Energy Particle Accelerator," *Phys. Rev.* 68 (1945) 143.

35) E. M. McMillan, "Resonance Acceleration of Charged Particles," *Phys. Rev.* 70 (1946) 800.

4-1 양성자 고정표적 가속기

초창기의 가속기들은 모두 고정된 표적에 가속된 입자를 충돌시키는 고정표적 가속기였다. 그러나 시간이 지남에 따라 이러한 형태의 가속기의 한계가 알려지면서, 다음에 살펴 볼 충돌가속기가 등장하게 된다. 아래의 논의에서는 편의상 고정표적 가속기를 가속기라 줄여 부르기로 한다.

최초의 가속기인 사이클로트론은 동위원소의 연구 또는 우라늄-235를 추출하는 용도 등으로 이용되었고, 소립자의 연구에 응용되기 시작한 것은 썩크로싸이클로트론부터였다. 처음 인공적으로 입자를 만들어 낸 가속기는 1946년에 제작된 로렌스-버클리 연구소(Lawrence Berkeley Laboratory, 이하 LBL)의 184인치 썩크로싸이클로트론이었다.³⁶⁾ 이 가속기의 주된 관심사는 당시에 핵력을 전달해 주는 입자라 생각했던 파이온이었다. 파이온이 LBL에서 처음으로 검출된 것은 1949년으로, 입사에너지가 380MeV인 알파입자를 탄소 핵에 충돌시켜 양성 파이온(π^+)을 검출하는데 성공했다.³⁷⁾ 하지만, 하전 파이온(π^+)은 이미 1947년에 우주선에서 발견되었기 때문에, 존재할 것으로 추측은 하고 있었으나 당시까지 발견되지 않았던 중성 파이온(π^0)의 검출에 주력하여, 마침내 다음 해인 1950년에 π^0 를 발견했다.³⁸⁾ 같은 해, 버클리의 300MeV 전자 싱크로트론에서도 그 존재가 확인되었다.³⁹⁾ 당시에 세계의 여러 곳에 가속기가 속속 건설되어 1948까지 미국에 21개, 유럽에 14개의 가속기가 제작되었고, 일본도 사이클로트론을 보유하고 있었다. 그 중에서 1951년에 건설된 시카고 썩크로싸이클로트론은 핵자의 공명상태인 델타(Δ)입자의 존재를 발견하는 성과를 거두었는데, 이는 가속기를 이용해서 핵자의 하부구조가 존재한다는 사실을 밝혀 낸 최초의 직접적인 증거였다.

Δ -입자는 핵자가 여기되었을 때 가장 낮은 에너지(1232 MeV)에서 나타나는 공명상태로, $\pi+N$ 충돌실험에서 페르미(Enrico Fermi)가 주축이었던 시카고대학 팀에 의해 발견되었다. 시카고를 포함하여 당시의 대부분의 양성자 가속기는 양성자를 원자핵에 충돌시켜 파이온을 생성한 다음에, 특정한 에너지와 스핀을 가진 파이온을 골라내 다른 핵 또는 핵자에 충돌시켜 이들 사이의 상호작용을 연구하는데 주로 이용되었다. 이렇게 입사입자의 일차 충돌에 의해 생성된 중간자를 다시 입사입자로 이용하는 방식의 가속기를 중간자 공장(meson factory)이라 부른다. 중간자 공장은 중간자뿐만 아니라, 중간자가 붕괴하면서 방출하는 고에너지 경입자를 이용하는 충돌실험에도 이용된다. 예를 들면, 중간자의 하나인 파이온은 뮤온과 뮤온중성미자로 붕괴하고, 뮤온은 다시 전자, 전자 중성미자, 그리고 뮤온 중성미자로 붕괴한다.

1950년대에 들어서면서, 양성자 가속기는 썩크로싸이클로트론 세대에서 싱크로트론의 세대로 넘어 갔다. 그리고, 서서히 미국, 소련, 유럽 사이에 최고 에너지의 가속기를 보유하기 위한 경쟁이 본격화되어 갔다. 사실, 입자물리학의 특성상 가장 높은 에너지의 가속기를 보유한 국가가 중요한 발견

36) J. Bufening, E. Gardner, C. M. G. Lattes, "Positive Mesons Produced by the 18-Inch Berkeley Cyclotron," *Phys. Rev.* 75 (1949) 382.

37) 알파입자의 실험실에너지 380MeV는 핵자 당 에너지가 95MeV에 불과해 파이온을 생성해내기에는 부족한 에너지였다. 그들이 관찰한 파이온은 탄소 핵의 내부에 이미 존재하는 것들로, 이들이 가진 페르미 에너지(fermi energy)때문에 이 에너지로도 검출이 가능했다.

38) R. Bjorkland, W. E. Crandall, B. J. Moyer, H. F. York, "High Energy Photons from Proton-Nucleus Collisions," *Phys. Rev.* 77 (1950) 213.

39) J. Steinberger, W. K. H. Panofsky, J. Steller, "Evidence for the Production of Neutral Mesons by Photons," *Phys. Rev.* 78 (1950) 802.

을 거의 독점할 수 있기 때문에, 최고의 가속기는 입자물리학 분야에서의 선두의 위치를 자동적으로 보장해 주기도 한다. 최초의 양성자 싱크로트론은 미국의 부록헤이븐 국립연구소(Brookhaven National Laboratory, 이하 BNL)에 1952년에 건설된 코스모트론(Cosmotron)이었는데, 파이온과 V-입자의 성질을 연구하는 것이 주목적이었다. 코스모트론은 GeV 영역을 처음으로 넘어 선 가속기였으며, V-입자를 생성할 수 있는 최초의 가속기이기도 했다. 한편, 코스모트론은 물리학자들 뿐만이 아니라, 다양한 분야의 과학자들 사이의 공동연구를 자리잡게 하는 계기를 만들었다. 코스모트론은 미 동부의 9개 대학이 공동으로 관리·운영했으며, 프린스턴대학은 펜실바니아대학과 함께 양성자 가속기를, 그리고 하버드대학은 MIT와 공동으로 전자가속기 CEA(Cambridge Electron Accelerator)를 제작·사용했다. 코스모트론은 약 2년여 동안 선두를 지키다가, 1954년 LBL의 베바트론(Bevatron)에 선두 자리를 내주었다. 베바트론은 디랙(P. A. M. Dirac)이 예언했던 반입자, 그 중에서도 반양성자의 존재를 확인하는 것이 주임무였다.

두 싱크로트론은 주어진 임무를 훌륭하게 완수했다. 양성자를 3GeV까지 가속할 수 있었던 코스모트론은 1954년에는 Σ ^[10], 1957년에는 Σ^{*11} , 그리고 1959년에는 Ξ ^[12] 등의 기묘한 입자들, 그리고 1961년에는 p^{*31} 등의 중간자의 공명상태들을 발견했으며, 그리고 1955년에는 K , Λ , Σ 등의 기묘한 입자들이 항상 짝수 개만큼 생성되는 것을 확인하여 V-입자의 연관생성(associated production) 이론을 증명했다.^[11] 반입자의 생성을 위해 코스모트론보다 2배 높은 에너지인 6GeV로 설계된 베바트론은^[13] 1955년 반양성자($\bar{p}$)^[14]의 발견을 시작으로, 1956년 반중성자($\bar{n}$)^[17], 1960년 $\bar{\Sigma}^{*48}$ 등의 반입자들, 그리고 $\Lambda(1405\text{MeV})$ ^[19]와 $\Xi(1530\text{MeV})$ ^[20] 같은 하이퍼론의 공명상태, 또 η ^[21]와 ω ^[22] 등의 새로운 중간자를 발견하는 등 많은 업적을 이루었다.

1950년대 중반까지의 입자물리학은 미국의 독무대였다고 말할 수 있다. 하지만 1950년대 후반부터 소련과 유럽이 최고 에너지 가속기 제작 경쟁에 참여하면서, 입자물리학의 주도권을 둘러싼 경쟁이 치열해져 입자물리학의 발전이 한층 가속화되었다. 베바트론이 건설된 지 3년만에 미국은 최고 에너지 가속기 보유국의 위치를 소련에 넘겨주었다. 1957년 소련의 듀브나(Dubna)에 10GeV의 가속능력을 가진 싱크로페이조트론(Synchrophasotron)이 건설된 것이다. 듀브나 가속기는 $\bar{\Sigma}^{*53}$ 를 발견하는 성

[10] W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thorndike, W. L. Whittemore, "Production of Heavy Unstable Particles by Negative Pions," *Phys. Rev.* 93 (1954) 861.

[11] R. Plano, N. P. Samios, M. Schwartz, J. Steinberger, "Demonstration of the Existence of the Σ Hyperon and Measurement of its Mass," *Nuovo Cim.* 5 (1957) 216.

[12] L. W. Alvarez *et al.*, "Neutral Cascade Hyperon Event" *Phys. Rev. Lett.* 2 (1959) 215.

[13] D. L. Stonehill *et al.*, "Pion-Pion Interaction in Pion Production by $\pi+p$ Collisions," *Phys. Rev. Lett.* 6 524.

[14] W. D. Walker, " Λ - $\bar{\Lambda}$ Production in π -p Collisions at 1 BeV," *Phys. Rev.* 98 (1955) 1407.

[15] 설계는 6GeV로 했으나, 실제로는 6.2GeV까지 가속이 가능했다.

[16] O. Chamberlain, E. Segre, C. Wiegand, T. Ypsilantis, "Observation of Antiproton," *Phys. Rev.* 100 (1955) 947.

[17] B. Cork, G. R. Lambertson, O. Piccioni, W. A. Wenzel, "Antineutron Produced from Antiproton in Charge Exchange Collisions," *Phys. Rev.* 104 (1956) 1193.

[18] J. Button *et al.*, "Evidence for the Reaction $pp \rightarrow \Sigma^+ \Lambda$," *Phys. Rev. Lett.* 4 (1960) 530.

[19] M. H. Alston *et al.*, "Study of Resonances in the $\Sigma\pi$ System," *Phys. Rev. Lett.* 6 (1961) 698.

[20] G. M. Pierrou *et al.*, "Resonance in the $(\Xi\pi)$ System at 1.53GeV," *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 114.

[21] A. Pevsner *et al.*, "Evidence for a Three Pion Resonance Near 550 MeV," *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 421.

[22] B. C. Maglic, L. W. Alvarez, A. H. Rosenfeld, M. L. Stevenson, "Evidence for a $T = 0$ Three Pion Resonance," *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 178.

[23] W. Kang-Chang *et al.*, " Σ Production by 8.3BeV $c\pi^-$ Mesons," *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 38 (1960) 1356.

과를 거두기는 했으나, 당시 최고의 에너지를 가지고 있었음에도 불구하고 운영상의 비효율성으로 입자물리학의 발전에 중요한 영향을 거의 미치지 못했다. 2년 뒤인 1959년에 최고가속기의 위치는 다시 25GeV의 가속능력을 가진 CERN⁵⁵⁾의 양성자-싱크로트론(이하 CERN-PS)에게 넘어갔다. 그러나, CERN-PS도 최고의 에너지에도 불구하고 기대한 만큼의 성과를 거두지 못했다. 그 이유는 당시 유럽의 인적자원이 미국에 비해 열등했었고, 또 거대한 조직을 여러 나라가 공동으로 운영하고 관리하는 능력을 습득하는데 다소의 기간이 필요했는데, 제작된 지 1년도 못 되어서 더 높은 에너지를 가진 가속기가 미국에 등장했기 때문이었다. 실제로 1960년대의 CERN-PS는 1962년에 Σ^+ 입자⁵⁶⁾를 발견하는 등의 미미한 성과에 그쳤다. 그러나, 1970년대에 들어서 양성자를 직접 표적입자에 충돌시키지 않고, 양성자와 중핵의 충돌 후에 만들어지는 고에너지 전자, 뮤온, 그리고 중성미자 등의 경입자 이차선(secondary beam)을 표적에 충돌시키는 형태로 가속기를 개조하여, 1973년 약중성전류(weak neutral current)의 존재를 발견하는 개가를 올렸다.⁵⁷⁾ 이는 약력을 전달하는 Z^0 -보존의 존재를 예언하는 발견이었을 뿐만 아니라, 전자기력과 약력이 하나의 힘일 수 있다는 중요한 증거였다. 현재 CERN-PS는 충돌가속기인 CERN-SppS에 양성자를 공급하는 역할을 담당하고 있다.

1960년 미국의 BNL에는 코스모트론의 뒤를 이은 30GeV의 차세대 싱크로트론 AGS(Alternating Gradient Synchrotron)가 완성되어 유럽의 CERN-PS로부터 선두의 자리를 미국으로 회수해 옴과 동시에, 입자의 휘도(luminosity)를 혁신적으로 개선시킨 스트롱 포커싱(strong focusing)⁵⁸⁾ 기술을 처음으로 채택하여,⁵⁹⁾ 1972년 페르미연구소에 200GeV PS가 건설되기 전까지 중요한 발견을 거의 독점했다.

AGS는 뮤온중성미자(ν_μ)⁶⁰⁾와 ϕ -중간자⁶¹⁾를 발견했을 뿐만 아니라, 쿼크모형의 정립에 결정적인 역할을 했던 두 입자를 발견했다. 하나는 1964년에 발견한 Ω 입자,⁶²⁾ 다른 하나는 1974년에 발견한 J/Ψ 입자이다.⁶³⁾

BNL의 AGS에 이어 두 개의 주요한 PS가 1960년대 초반에 건설되었다. 하지만, 에너지가 AGS에 비해 낮아 주목할 만한 발견을 보여주지는 못했다. 하나는 미국의 알곤 국립연구소(Argonne National Laboratory)에 건설된 ZGS(Zero Gradient Synchrotron)으로 12.5GeV의 가속능력을 가지고 있었고, 다른 하나는 영국의 러더포드 연구소(Rutherford Laboratory)에 건설된 가속능력 7GeV의 NIMROD⁶⁴⁾였

54) 주 24 참조.

55) Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire(유럽 공동 원자핵 연구회의), 기초물리학의 발전을 위해 유럽의 11개국이 1952년에 결성한 모임으로 스위스의 제네바에 본부를 두고 있다. 현재 13개국이 가맹.

56) CERN-Ecole Polytechnique-Saclay collaboration, "Example of Anticascade Σ^+ Particle Production in pp Interactions at 3.0 GeV/c," *Phys. Rev. Lett.* 8 (1962) 138.

57) F. J. Hasert *et al.*, "Search for Elastic Muon-Electron Scattering," *Phys. Lett.* 46B (1973) 121, F. J. Hasert *et al.*, "Observation of Neutrino-like Interactions without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment," *Phys. Lett.* 46B (1973) 138.

58) E. D. Courant, M. S. Livingston, H. S. Snyder, "The Strong Focusing Synchrotron - A New High Energy Accelerator," *Phys. Rev.* 88 (1952) 1190.

59) AGS Staff, "Some Operating Characteristics of the Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron," *HEACC-61*, 39 (1961).

60) C. T. Dandy *et al.*, "Observation of High Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrino," *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36.

61) L. Bertanza *et al.*, "Possible Resonances in the $\Xi\pi$ and $K\bar{K}$ Systems," *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 180, P. Schlein *et al.*, "Quantum Numbers of a 1020 MeV $K\bar{K}$ Resonances," *Phys. Rev. Lett.* 10 (1963) 368.

62) V. E. Barnes *et al.*, "Observation of a Hyperon with Strangeness Minus Three," *Phys. Rev. Lett.* 12 (1964) 204.

63) J. L. Aubert *et al.*, "Experimental Observation of a Heavy Particle J," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1404.

다.

1964년 Ω^- 의 발견에 이어 발표된 겔만(Murray Gell-Mann)의 쿼크모형은 기존의 가속기로는 해결할 수 없는 숙제를 던져 주었다. 쿼크의 존재를 확인하기 위해서는 더 높은 에너지의 가속기가 필요했다. 1967년에 소련의 고에너지연구소(Institute for High Energy Physics at Serpukhov)에 70GeV Serpukhov PS가 건설되었으나, 이 가속기는 다른 소련의 가속기와 마찬가지로 기대한 만큼의 성과를 내지 못하고, 1972년 페르미 연구소의 200GeV PS에게 선두 자리를 넘겨주었다. 미국이 200GeV PS의 제작에 착수하자, CERN은 1970년에 이 보다 2배 이상 높은 에너지인 450GeV로 설계된 CERN-SPS(Super-Proton Synchrotron)의 제작에 착수하여 1976년 완공했다. 하지만, 1975년에 Fermilab-PS의 가속능력이 이미 500GeV로 향상되어, 불행하게도 CERN은 선두의 꿈을 이루지 못하고 말았다. 또 다시 페르미 연구소는 1984년 초전도 자석을 이용하여 가속능력을 1 TeV로 향상시킨 테바트론(Tevatron)을 완성했다. 테바트론은 현재 PS 중에서 가장 높은 에너지를 내는 가속기이다.

CERN-SPS와 Fermilab-PS가 실험에 착수할 즈음인 1970년대 중반에는 이미 입자물리학 실험의 선도적 위치가 전자-양전자 충돌가속기로 넘어 갈 무렵이었다. 따라서, 처음에는 괄목할만한 발견을 이루기도 했지만, 점차 이들은 충돌가속기에서 발견한 사실을 재확인하거나 증거를 보강하는 이차적인 용도로 이용되었다. 물론, 양성자와 핵자 사이의 일차 충돌에서 생성되는 강입자를 연구하기도 했지만, 주로 그렇게 생성된 강입자들이 붕괴하면서 방출하는 경입자를 다시 입사입자(projectile)로 이용하는 실험에 응용되었다.

Fermilab-PS는 1977년 레더맨을 중심으로 다섯 번 째 쿼크인 b-쿼크(bottom-quark)와 반b-쿼크로 구성된 바토모니움, 즉 읍실론(Γ)-입자와⁶⁵⁾ 그 여기상태인 $\Gamma(2S)$ 를⁶⁶⁾ 발견하는 쾌거를 이루었다. CERN-SPS는 경입자 이차선(leptonic secondary beam)을 이용한 약상호작용의 연구에 주로 응용되었다.

앞서 언급한 바와 같이, 1950년대와 1960년대에 입자물리학의 발견을 주도했던 PS들은 1970년대에 들어서면서 서서히 에너지 효율 면에서 월등히 앞서는 충돌가속기에 주도적 위치를 넘겨주고, 파이온 등의 중간자 그리고 뮤온과 중성미자 등의 경입자를 생성해내는 중간자 및 경입자 공장의 역할을 주로 담당하게 되었다. 예를 들어 입사에너지가 1 TeV인 양성자를 고정된 양성자에 충돌시키면, 에너지와 운동량 보존법칙에 의한 제약으로 그 중 약 4%인 43GeV 정도만이 새로운 입자를 생성하는 에너지로 전환되지만,⁶⁷⁾ 이 둘을 정면 충돌시키면 2 TeV 모두가 순수한 에너지로 전환이 가능하다. 따라서, 1971년 질량중심계 에너지가 62GeV인 양성자 충돌가속기 CERN-ISR(Intersecting Storage Rings)이 실험에 착수하면서, PS는 화려했던 시절을 마감하게 되었다.

한편, 1950년대와 1960년대에 입자의 가속과 검출과 관련된 기술에 많은 발전이 있었는데, 이는 가속기의 효율과 경제성의 제고에 많은 기여를 했다. 먼저, 가속기의 성능과 관련된 주요한 진전을 살펴보면, 위상복원(phase stability), 스트롱 포커싱(strong focusing), 다단계 가속(cascade acceleration), 초전도 자석(superconductor magnet) 등을 꼽을 수 있다. 위상복원은 입자들이 가속될 때 상대적으로 앞서거나 뒤진 입자의 속도를 조절해 주는 기술로 1940년대 후반에 앞서 언급했던 벅슬러와 맥밀란

64) 성서에 등장하는 노아의 후손으로 사냥을 잘했다는 사람의 이름이다.

65) S. W. Herb *et al.*, "Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400 GeV Proton-Nucleus Collisions," *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977) 252.

66) W. R. Innes *et al.*, "Observation of Structure in the Γ Region," *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977) 1240.

67) 실험실계에서의 입사에너지가 E 인 입자가 상대론적인 속도로 정지질량이 m 인 입자와 충돌할 때, 질량중심 계 에너지는 다음의 공식과 같이 결정된다. $E_{cm} = \sqrt{2mE}$

에 의해 고안되어 썩크로싸이클로트론의 탄생에 가져왔다. 스트롱 포커싱은 가속되는 입자들의 밀도를 높여주는 기술로 입자들의 충돌확률을 크게 개선시켰으며, 가속기 제작 경비를 줄이는 데에도 많은 기여를 했다. 이 기술은 CERN-PS의 제작에 처음으로 응용되었는데, 이 기술 덕으로 입자들이 가속되는 스테인레스 진공튜브의 반경을 10분의 1 수준으로 낮출 수 있어서, CERN은 처음에 생각했던 10GeV 보다 높은 25GeV의 가속기를 같은 예산으로 건설할 수 있었다. 다단계 가속은 자동차의 기어를 변속해 주듯이 입자를 여러 단계로 나누어 가속하는 방법을 말한다. 현재 테바트론은 양성자를 다섯 단계에 걸쳐 1TeV 까지 가속시킨다. 초전도 자석은 가속기의 성능을 결정하는 두 가지 요인, 즉 가속기의 반경과 자기장의 세기 중 하나인 자기장의 세기를 증폭시켜, 같은 반경의 가속기로 더 높은 에너지를 얻을 수 있게 해 주었고, 강한 자기장을 유지하는데 필요한 막대한 전력을 절약할 수 있게 해 주었다.⁶⁸⁾

입자검출장치 분야에서의 진전을 몇 가지 살펴보면, 먼저 1953년에 글라서(Donald A. Glaser)가 발명한 거품상자(bubble chamber)를 들 수 있다.⁶⁹⁾ 거품상자는 과거의 안개상자가 가진 단점을 크게 보완한 검출장치로 베바트론에 처음으로 실용화되었는데, 전자장치를 이용한 검출장치가 등장하기 전까지 가장 중요한 검출장치 역할을 했다.⁷⁰⁾ 한편, 1950년대 후반에는 거품상자에 나타난 입자들의 궤적의 분석에 컴퓨터가 이용되기 시작하여 사진필름에 나타난 궤적을 분석하는 시간이 획기적으로 단축되었다. 또, 전기적으로 입자의 궤적을 추적할 수 있는 스파크 상자(spark chamber) 또는 방전 상자(discharge chamber)⁷¹⁾가 개발되었는데, 이로써 원하는 물리적 사건만 선택적으로 검출하여 분석하는 것이 가능해 졌다. 오늘날의 입자검출장치는 입자의 궤적뿐만이 아니라 에너지와 운동량 등이 자동적으로 컴퓨터에 의해 분석된다. 오늘날 주로 이용되는 검출장치는 다선비례상자(multi-proportional wire chamber)⁷²⁾와 실리콘 검출기(silicon strip detector)⁷³⁾ 등이다. 다음의 표 2는 주요 양성자 고정표적 가속기와 이들이 발견한 주요 입자 및 물리적 사실을 정리한 것이다.

• 표 2. 주요 양성자 고정표적 가속기⁷⁴⁾

1946: 184-인치 Synchrocyclotron, LBL, 200 MeV.

π (1950)

1949: Nevis Synchrocyclotron, Columbia Univ., 400 MeV.

1951: Chicago Synchrocyclotron, 450MeV.

Δ (1951)

1952: Cosmotron, BNL, 3 GeV.

Σ (1954), 연관생성이론 증명(1955), Σ (1957), Ξ (1959), p (1961)

1954: Liverpool synchrocyclotron, 400 MeV.

1954: Bevatron, LBL, 6.2 GeV.

68) 초전도자석을 이용하기 전 페르미연구소에서 사용하는 전력의 80%가 자기장을 유지하는데 소모되었다.

69) D. A. Glaser, "Bubble Chamber Tracks of Penetrating Cosmic Ray Particles," *Phys. Rev.* 91 (1953) 762.

70) 안개상자는 입자의 밀도가 작아서 충돌확률이 낮았고, 사용 후에 원상태로 복원시키는데 필요한 시간이 길었다.

71) S. Fukui, S. Miyamoto, "A New Type of Particle Detector: the Discharge Chamber," *Nuovo Cim.* 11 (1959) 113.

72) G. Charpak *et al.*, "The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles," *Nucl. Instr. and Meth.* 62 (1968) 262.

73) K. G. McKay, "A Germanium Counter," *Phys. Rev.* 76 (1949) 1537.

74) 여기서 가속기의 에너지는 모두 실험실계 에너지이다.

$\bar{p}$ (1955), $\bar{n}$ (1956), $\bar{\Sigma}$ (1960), $\Lambda(1405S_{11})$ (1961), $\Xi(1530P_{11})$ (1962), η (1961), ω (1961)
 1957: Dubna, 10GeV.
 $\bar{\Sigma}$ (1960)
 1959: CERN AG PS 30GeV.
 $\bar{\Sigma}'$ (1962), 약중성전류(1973)
 1960: BNL AGS 30GeV.
 u_c (1962), Φ (1962), Ω (1964), c-쿼크(J/ Ψ)(1974)
 1962: ZGS Argonne NL 12.5GeV
 1963: NIMROD, Rutherford Lab. 7GeV
 1967: Serpukhov 70GeV proton
 스케일링 확인(1970)
 1972: Fermilab, Tevatron 500GeV.
 b-쿼크(Γ)(1977), (2S)(1977)
 1976: CERN superproton synchrotron 450GeV
 1977: KEK PS 12GeV
 1984: Tevatron 1 TeV

4-2 전자 고정표적 가속기

현존하는 전자 고정표적 가속기 중에서 가장 높은 에너지를 내는 것은 1966년에 건설된 스탠포드 대학에 있는 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)의 선형가속기로, 가속한계는 22GeV이다. 이 수치는 양성자가속기인 테바트론 에너지 1 TeV의 약 2%에 불과하다. 그 이유는 전자를 가속시키는 것이 양성자에 비해 비효율적이기 때문이다. 하전입자가 가속운동을 하게 되면 전자기 복사파를 방출하는데, 그 에너지는 질량이 작을수록 커진다. 예를 들어 어떤 하전입자를 싱크로트론으로 가속시키면, 구심가속에 의한 복사가 방출되는데 이를 싱크로트론 복사(synchrotron radiation)라 한다. 이 값(P_R)은 입자의 에너지와 정지질량에 다음과 같이 비례한다.

$$P_R \propto \left(\frac{E}{m_0 c^2} \right)^4$$

따라서 어떤 원형가속기로 같은 에너지(E)를 가진 전자와 양성자를 가속시키는 경우, 싱크로트론 복사량이 정지질량(m_0)의 4제곱에 반비례하기 때문에, 전자의 복사량이 양성자보다 10^{13} 배 이상 많다. 스탠포드 대학이 싱크로트론이 아니라 선형가속기를 건설한 것은 싱크로트론 복사를 배제하기 위해서였다. 선형으로 가속시키더라도 전자의 복사량이 양성자보다 훨씬 크기는 마찬가지이다.

표 3에 나타난 것과 같이, 1960년대 후반까지 많은 전자가속기가 건설되었으나, 양성자 가속기에 비해 가속능력이 떨어지고, 또 전자는 강력의 영향을 받지 않기 때문에 강입자의 연구가 주된 관심의 대상이었던 당시에 SLAC의 선형가속기를 제외한 다른 전자가속기들은 주도적인 역할을 하지는 못했다. 대부분의 전자가속기는 양성자 가속기에서 이미 발견된 사실을 확인하거나 자료를 보강하는 정도

로 이용되었다. 그러나, 다음에 살펴보겠지만, 전자와 양전자를 정면으로 충돌시키는 전자-양전자 충돌가속기가 등장하면서 전자 충돌실험은 새로운 주목을 받게 된다.

전자는 근본입자이면서 강력의 영향을 받지 않기 때문에, 핵 또는 핵자의 전기적인 구조를 연구하기에는 가장 적합한 입자이다. 1950대 초반에는 핵자를 근본입자로 생각하는 견해가 우세했었기 때문에, 전자를 핵자에 충돌시켜 핵자의 크기와 전기적 구조를 연구하는 것이 전자가속기의 가장 중요한 임무였다. 최초로 전자와 핵의 충돌실험이 행해진 것은 1951년이였다.⁷⁵⁾ 한편, 1956년 홉스테더(Robert Hofstadter)는 188MeV의 전자를 양성자에 충돌시켜 양성자가 양의 점전하가 아니라 $0.74 \pm 0.24 \text{ fm}$ 정도의 유한한 크기를 가진 입자라는 사실을 밝혀 낸 공로로 1961년 노벨 물리학상을 수상했다.⁷⁶⁾ 양성자가 점전하가 아니라는 사실은 양성자를 근본입자로 볼 수 없는 하나의 징후였다.

1966년 완공된 SLAC은 홉스테더보다 100여 배 높은 22GeV의 전자를 이용해 핵자의 전기적 구조를 탐색할 수 있었다. 1969년 SLAC은 핵자 내의 쿼크의 존재를 암시하는 스케일링(Scaling)을 발견하는 쾌거를 이루었다. 부분전하를 가진 세 개의 점전하가 핵자의 내부에서 매우 빠른 속도로 운동하고 있다는 사실을 발견했던 것이다. 이 실험은 파인만의 파톤모형(partonic model)의 탄생을 가져 왔다. 또 SLAC은 1971년 Ω^- 의 반입자인 $\bar{\Omega}^+$ 를 발견하기도 했다.⁷⁷⁾

전자가속기가 커다란 성과를 가져다주지는 못했지만, 1969년에 있었던 SLAC의 발견은 강입자 충돌(hadronic collision) 이외에 경입자 충돌(leptonic collision)의 중요성을 일깨워 주는 계기가 되었다. 이와 함께 1967년 발표된 약력과 전자기력이 본질적으로 동일한 힘이라는 와인버그(Steven Weinberg)와 살람(Abdus Salam)의 이론도 경입자 충돌실험의 물리적 중요성을 부각시키는 역할을 했다. 이에 따라 CERN-PS와 Fermilab-PS은 이차 빔(secondary beam)을 이용한 실험이 가능하도록 개조되었고, 이곳에서 행해진 중성미자-핵자 충돌실험에서도 스케일링이 확인되었다. 앞서 언급한 바와 같이 와인버그-살람 모형의 결정적 증거가 되는 중성전류의 존재를 확인한 것도 경입자 충돌실험을 통해서였다.

• 표 3. 전자 고정표적 가속기

1947: Stanford Mark I 6MeV
1949: Stanford Mark II 35MeV
1950: Stanford Mark III 75 MeV
1953: Cornell AG(Alternating Gradient) 1.2GeV
1960: Stanford Mark IV 1GeV
1962: CEA(Cambridge Electron Accelerator) 9GeV
1964: DESY 7GeV
1966: NINA 5GeV
1966: SLAC 22GeV
스케일링 발견(1969), $\bar{\Omega}^+$ (1971)

75) E. M. Lyman, A. O. Hanson, M. B. Scott, "Scattering of 15.7MeV Electrons by Nuclei," *Phys. Rev.* 84 (1951) 626.

76) R. W. McAllister, R. Hofstadter, "Elastic Scattering of 188 MeV Electrons from Proton and the Alpha Particle," *Phys. Rev.* 102 (1956) 851.

77) I. Firestone et al. "Observation of the $\bar{\Omega}^+$," *Phys. Rev. Lett.* 26 (1971) 410.

1967: Yerevan 6GeV

1967: Cornell AG syn. 12GeV

4-3 전자-반전자 충돌가속기

입자와 반입자가 충돌해서 쌍소멸(pair annihilation)되면 에너지 보존법칙이 허용하는 한 모든 종류의 입자들이 만들어질 수 있으므로, 전자와 양전자를 쌍소멸시켜 생성되는 입자의 성질을 연구하고자 하는 생각은 일찍부터 등장했다. 그러나, 충돌 빔의 회도와 입자검출장치 등의 기술적인 문제의 해결이 늦어 전자-양전자 충돌가속기(Electron-Positron Collider; 이하 EPC)는 1960년대에서야 등장하게 되었다. 초창기 가속기의 제작에 많은 공헌을 남긴 커스트(D. W. Kerst)가 1956년 FAGA(Fixed-field Alternating Gradient Accelerator) 방식의 충돌가속기를 제안한⁷⁸⁾ 7년 후인 1963년에 첫 번째 EPC가 이태리의 Frascati 국립연구소에서 제작되었다. ADA(Anello d'Accumulazione)라 불렸던 이 EPC는 전자와 양전자를 0.25GeV로 가속할 수 있었는데, 실험에는 응용되지 못하고 EPC에 관련된 기술을 습득하는 용도로 사용되었다. 한편, 스탠포드 대학도 전자와 반전자가 아니라, 전자와 전자를 총에너지 1GeV로 충돌시키는 가속기를 제작했다.

실제로 실험에 응용된 EPC가 등장한 것은 1967년으로, 이 해에 모두 2기가 제작되었다. 하나는 앞서 언급한 이태리의 EDA를 개량한 ADONE이었고, 다른 하나는 하바드대학과 MIT가 공동으로 운영하던 CEA를 충돌가속기로 개조한 BYPASS이었다. ADONE은 1971년 색전하(color charge)의 존재와 관련된 중요한 사실을 발견했다. 최대 질량중심계 에너지가 3GeV였던 ADONE은 1~3GeV사이의 에너지 영역에서 생성되는 강입자들을 주로 연구했다. 당시 이론물리학자들은 이 에너지 영역에서는 강입자를 생성할 전자-양전자 산란단면적(cross-section)이 에너지가 증가함에 따라 급속히 감소할 것으로 예상했었으나, ADONE은 예상 밖의 실험결과를 보여 주었다. 생성되는 강입자의 수가 감소하지 않았던 것이다. 나아가, 생성되는 파이온의 수가 당시의 쿼크모형에서 예상했던 것보다 3배 많다는 사실을 발견했다. 이 실험결과는 이론적으로는 이미 1965년에 등장했던 색양자수(color quantum number)의 실재가능성을 더욱 공고히 해주었고, 1973년에 겔만(Murray Gell-Mann)과 와인버그(Steven Weinberg) 그리고 살람(Abdus Salam)에 의해 완성된 양자색역학(quantum chromodynamics)을 향한 첫걸음이기도 했다. 한편, BYPASS는 질량중심계 에너지가 7GeV로 ADONE에 비해 2배 이상 높았으나, 전자와 양전자의 회도가 매우 낮아서 특기할 만한 실험결과를 내지는 못했다.

1972년 스탠포드대학에 질량중심계 에너지가 8.4GeV인 SPEAR(Stanford Positron Electron Annihilation Rings)가 실험에 착수하면서 EPC는 입자물리학 발전의 견인차 역할을 하게 되었다. 표 4에 나타난 바와 같이 SPEAR에 이어 세계의 여러 곳에 EPC가 건설되기 시작했다. SPEAR의 여러 발견 중에서 중요한 것 몇 가지를 간추려 보면 다음과 같다. 먼저 1974년에 발견한 c -쿼크를 들 수 있다. 즉, c -쿼크와 반 c -쿼크로 구성된 J/Ψ -입자⁷⁹⁾와 그 공명상태를⁸⁰⁾ 발견했는데, 이는 오늘날 11월 혁명이라 불리는 매우 획기적인 발견으로, 1964년의 Ω 의 발견에 이어 쿼크모형의 정당성을 뒷받침하는

78) D. W. Kerst *et al.*, "Attainment of Very High Energy by Means of Intersecting Beams of Particles," *Phys. Rev.* 102 (1956) 590.

79) J. E. Augustine *et al.*, "Discovery of Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1406.

80) G. S. Abrams *et al.*, "The Discovery of Second Resonance in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1453.

결정적인 증거였다. 이 입자의 존재는 부룩헤이븐의 AGS에서도 거의 동시에 발견되었고, ADONE에서도 재확인되었다.⁸¹⁾ c-쿼크가 발견되자 페르미연구소의 PS와 CERN의 SPS는 참강입자(charmed hadron)의 성질을 연구하는 작업을 맡게 되었다. c-쿼크의 발견으로 글라쇼가 예측한대로 경입자와 쿼크가 각각 4개씩으로 대칭을 이루는 듯이 보였다.

또 1975년에 SPEAR는 전자와 뮤온에 이은 일종의 무거운 전자인 타우온(τ)을 발견했는데,⁸²⁾ 이는 새로운 세대의 쿼크, 즉 b-쿼크와 t-쿼크가 존재한다는 징후가 되는 위대한 발견이었다. 타우(τ)라는 이름은 세 번째(third)의 첫 글자인 t에 해당하는 그리스어이다. 타우온은 SPEAR에서 발견되었지만, 그것의 성질을 조사하는 연구에는 DORIS가 많은 기여를 했다. 또 같은 해에 처음으로 쿼크제트(quark jet)라 불리는 현상을 관측하여, 쿼크의 실재성을 한층 강화시켰다.⁸³⁾ 그리고 다음 해인 1976년에는 D^{*+} , D^{*0} 등의 D-중간자의 발견을 통해, u-쿼크와 d-쿼크 사이의 관계와 유사한 관계가 c-쿼크와 s-쿼크 사이에도 존재한다는 사실을 밝혀, 약상호작용에 관한 이해를 높여주었으며, 또 세대의 개념을 한층 확고히 해주었다.

1974년에는 독일의 DESY(Deutsches Elektronen SYNchrotron laboratory)에 DORIS(DOuble Ring Storage facility)가 질량중심계 에너지 9GeV로 EPC분야의 선두로 등장했다. DORIS는 c-쿼크를 포함하고 있는 강입자의 성질을 연구했으며, 1978년에는 바토모니움의 다른 공명상태인 $\gamma(1S)$ 를 발견하기도 했다.⁸⁴⁾ 1976년에는 프랑스의 Orsay에 질량중심에너지가 3.2GeV인 DCI가 제작되었다.

타우온의 발견은 타우중성미자(ν_τ)와 함께, 최소한 2개의 쿼크가 더 존재한다는 증거로 해석되어, 새로운 쿼크를 찾는 실험이 본격화되었다. 정지질량이 3.1GeV인 J/ψ 보다 훨씬 무거운 것으로 추측되는 새로운 쿼크를 찾기 위해서는 더 높은 에너지가 필요했다. 당시에 쿼크의 발견 못지 않게 중요한 숙제가 하나 더 있었는데, 그것은 약력을 전달해주는 W^+ 와 Z^0 보손을 발견하는 일이었다. 그러나, 불행하게도 EPC는 이들을 발견하는데 실패했다.

질량중심계 에너지가 38GeV, 둘레가 2.3km에 달하는 PETRA(Positron-Electron Tandem Ring Accelerator)가 1978년 DESY에 만들어 졌으나, 완공되었을 때에는 이미 1977년 페르미연구소의 500 GeV PS에서 b-쿼크와 반b-쿼크로 이루어져 있으며, 정지질량이 9.5GeV인 웁실론(Υ)이 발견된 후였다. 하지만, 페르미연구소의 실험은 포괄적인 자료(inclusive data)인 관계로, 정밀한 분석을 위해서는 전자-반전자 소멸 후에 나타나는 γ 만의 배타적인 자료(exclusive data)가 필요했다. 1978년 PETRA는 웁실론의 존재를 확인했을 뿐만 아니라, 그것의 구조에 관한 상세한 연구결과를 보여 주었다. 또, PETRA는 1979년 글루온의 존재를 말해주는 글루온 제트(gluon jet)를 관측했다.⁸⁵⁾

81) C. Bacci *et al.*, "Preliminary Result of Frascati(ADONE) on the Nature of a New 3.1 GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1408.

82) M. L. Perl *et al.*, "Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 35 (1975) 1489, M. L. Perl *et al.*, "Properties of Anomalous $e\mu$ Events Produced in e^+e^- Annihilation," *Phys. Lett.* 63B (1976) 466.

83) G. Hanson *et al.*, "Evidence for Jet Structure in Hadron Production by e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 35 (1975) 1609.

84) G. Goldhaber *et al.*, "Observation in e^+e^- Annihilation of a Narrow State at 1865 MeV e^+e^- Decaying to $K\pi$ and $K\pi\pi$," *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 255.

85) I. Peruzzi *et al.*, "Observation of Narrow Charged State at 1876 MeV e^+e^- Decaying to an Exotic Combination of $K\pi\pi$," *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 569.

86) PLUTO collaboration; C. Berger *et al.*, "Observation of a Narrow Resonance Formed in the e^+e^- Annihilation at 9.46 GeV," *Phys. Lett.* 76B (1978) 243.

87) D. P. Barber *et al.*, "Discovery of Three Jet Events and a Test of Quantum Chromodynamics at PETRA Energies,"

1979년에 코넬대학에 건설된 CESR(Cornell Electron Storage Ring)은 질량중심에너지 16GeV로 PETRA와 함께 b-쿼크를 가진 강입자의 성질에 관한 연구에 응용되었는데, 1981년에는 B-중간자를 발견하기도 했다.⁸⁸⁾

표 4에 나타난 바와 같이 1980년대에 들어서, 보다 높은 에너지의 EPC가 여러 개 건설되었다. 1980년 스탠포드대학에 PEP(Proton-Electron Project)과 소련에 VEPP-IV, 1989년에 일본의 TRISAN, 미국의 SLC(Stanford Linear Collider), CERN의 LEP-I(Large Electron Positron collider-I), 중국의 BESR(Beijing Electron Storage Rings) 등이 그것들이다. 1990년대에 들어서 CERN의 LEP-II가 완공되어 현재 이 분야의 선두 위치를 지키고 있다.

이들이 지향하는 가장 큰 목표는 마지막 남은 t-쿼크를 찾는 것이었다. 차모니움인 J/ψ의 질량이 3.1 GeV이고, 바토모니움인 γ이 9.46 GeV이므로, 타보니움의 질량을 약 27GeV로 추측하는 사람도 있었다. 그러나, t-쿼크의 질량은 이 보다 훨씬 무거운 약 176 GeV 라는 사실이 다음에 살펴볼 양성자-반양성자 충돌가속기 테바트론에서 1995년 확인되었다. 그리고 W'와 Z'의 질량도 100GeV에 달해 현존하는 EPC로는 검출이 불가능했다. 다른 쿼크에 비해 t-쿼크가 월등하게 무거운 이유를 물리학자들은 아직 알지 못한다.

• 표 4. 전자-충돌가속기

1963: EDA, 0.25GeV+0.25GeV

1965: SLAC(e⁺e⁻), 0.5GeV+0.5GeV

1967: ADONE 1.5GeV+1.5GeV

색양자수(1971)

1967: BYPASS, 3.5GeV+3.5GeV

1972: CERN SPEAR 4.2GeV+4.2GeV

c-쿼크(ψ)(1974), τ(1975), 쿼크제트(1975), D (1976), D⁺ (1976)

1974: DORIS, DESY 4.5GeV+4.5GeV

γ-확인(1977)

1976: DCI, Orsay 1.6GeV+1.6GeV

1978: PETRA, DESY 19GeV+19GeV

γ-확인(1978), 글루온제트(1979)

1979: Cornell ESR, 8GeV+8GeV

B-중간자(1981)

1980: SLAC PEP 18GeV+18GeV

1980: VEPP-IV 7GeV+7GeV

1984: BEPC(Beijing Electron-Positron Collider), 3GeV+3GeV.

1987: TRISTAN, KEK 30GeV+30GeV

1989: SLC 50GeV+50GeV

1989: LEP-I, 50GeV+50GeV

Phys. Rev. Lett. 43 (1979) 830. JADE collaborations: W. Bartel *et al.*, "Observation of Planar Three Jet Events in the e⁺e⁻ Annihilation and Evidence for Gluon," *Phys. Lett.* 91B (1980) 142.

88) CLEO collaboration, C. Bebek *et al.*, "Evidence for New Flavor Production at the γ(4S)," *Phys. Rev. Lett.* 46 (1981) 84.

1994: SLAC PEP-II 착공.

1996: LEP-II, 90GeV+90GeV

4-4 양성자 충돌가속기

양성자를 가속하는 것이 전자에 비해 에너지 효율 면에서 월등히 높기 때문에, 양성자-반양성자 충돌장치의 필요성은 인식하고 있었으나, 표 5에서 볼 수 있는 것과 같이, 다른 가속기들에 비해 늦은 1970년대 초에 처음으로 건설되었다. 그것도 1971년에 실험에 돌입한 CERN-ISR(Intersecting Storage Rings)은 양성자와 양성자를 충돌시키는 가속기였고, 양성자와 반양성자 충돌실험은 CERN-SppS(Super pp Synchrontron)가 완공된 비교적 최근이라 할 수 있는 1981년에서야 이루어졌다. 그 이유는 다음과 같은 두 가지 기술적인 문제의 해결이 늦었기 때문이었다. 하나는 충분히 많은 양의 반양성자를 저장하는 일이 어려웠다. 반양성자는 반물질이기 때문에 주변의 물질과 충돌하면 소멸되어 버린다. 따라서, 반양성자를 저장하기 위해서는 고도의 진공상태를 유지해 주는 기술이 필요했다. 또 하나는 양성자가 근본입자가 아니어서, 양성자 충돌실험에서 과연 쿼크와 쿼크 사이에 충돌이 일어날까 하는 의문이 있었다. 그래서 충돌확률을 높이기 위해서는 아주 고밀도의 양성자 빔을 만드는 기술이 필요했다.

1971년에 완공된 양성자-양성자 충돌가속기 CERN-ISR(Intersecting Storage Rings)은 물리학의 발전에도 공헌했지만, 그 보다는 보다 효율적인 양성자 충돌기를 설계하고 제작하는 기술을 습득할 수 있었던 훈련장으로서의 의미가 더 컸다. CERN-ISR은 이름에서 알 수 있듯이 두 개의 저장링에서 각각 양성자를 가속시켜 충돌시키는 방식을 이용했다. ISR은 B-중입자인 $\Lambda_b^{(89)}$ 를 발견했으며, 양성자-양성자의 충돌시 쿼크와 쿼크의 충돌에 의해서 횡방향으로 분출되는 강입자들을 관측했다.⁸⁹⁾ 이는 양성자의 내부에 잘 깨지지 않는 단단한 입자가 존재한다는 증거였다.

1981년에 최초의 양성자-반양성자 충돌가속기였던 CERN-SppS가 건설될 수 있었던 것은 반 데 미르(Simon van der Meer)가 착안한 임의냉각(stochastic cooling)⁹⁰⁾ 기술 덕분이라 해도 과언이 아니다. 이 기술은 양성자와 반양성자의 회도를 획기적으로 개선시켰는데, 이 기술로 인해 기존의 CERN-SPS를 CERN-SppS로 개조하는 사업이 재가되었고, 반 데 미르는 1984년 노벨 물리학상을 수상했다. CERN-SppS는 두 개의 원형 링이 필요했던 ISR과는 달리 둘레가 약 7km인 하나의 원형 링에서 양성자와 반양성자를 낮은 밀도의 상태로 각기 반대방향으로 가속시킨 다음, 충돌을 일으킬 때에는 이들의 밀도를 높여주는 방법을 사용했다. 이 방법은 루비아(Carlo Rubbia), 클라인(David Cline), 그리고 매킨타이어(Peter McIntyre)에 의해 고안되었다.

1989년 페르미연구소의 테바트론 충돌가속기가 실험에 착수하기 전까지 CERN-SppS는 타의 추종을 불허하는 독보적인 위치를 차지할 수 있었을 뿐만 아니라, 당시의 가장 큰 관심의 대상이었던 약력의 전달자인 $W^{+92)}$ 와 $Z^{93)}$ 을 발견했다.

89) M. Basile *et al.*, "Evidence for a New Particle with Naked Beauty and for its Associated Production in High Energy (pp) Interactions," *Lett. Nuovo Cim.* 31 (1981) 97.

90) F. W. Buesser *et al.*, "Observation of π^- Mesons with Large Transverse Momentum in High Energy Proton-Proton Collisions," *Phys. Lett.* 46B (1973) 471.

91) G. Carron *et al.*, "Stochastic Cooling Test in ICE(Initial Cooling Experiment)," *Phys. Lett.* 77B (1978) 353.

92) UA1 collaboration: A. Arnison *et al.*, "Experimental Observation of Isolated Large Transverse Energy Electrons with

한편, 미국도 1978년 CERN-ISR과 같은 방식의 양성자-양성자 충돌가속기인 800GeV ISABELLE을 BNL에 건설하는 프로젝트에 착수했으나, 중도에 계획이 취소되었다. 비경제적이라는 것이 가장 큰 이유였지만, 기술적인 문제도 있었다. 루비아 등에 의해 하나의 링을 사용하는 방법이 고안되어, 두 개의 링을 건설해야 하는 ISABELLE의 비경제성이 문제시되었고, 또 설계시 초전도 자석을 이용하려고 했으나 기술적으로 해결해야 할 문제가 산적해 있었다. 또한, 1987년 1월 당시 미국의 레이건 대통령이 텍사스주의 왁사치(Waxahachie)에 둘래 87km, 양성자 가속에너지 20TeV로 설계된 SSC(Superconducting Super Collider)의 건설을 재가했으나, 재정적인 문제로 취소되었다.

CERN이 CERN-SPS를 CERN-Sp $\bar{p}$ S로 개조하자, 페르미연구소도 테바트론을 충돌가속기로 개조하는 작업에 착수했다. 테바트론의 반경은 약 920 미터로 CERN-SPS의 반경인 1100미터에 비해 작았다. 그러나, 초전도 자석을 이용하여 한층 강력한 자기장을 형성할 수 있어, 가속 능력은 테바트론 충돌가속기가 CERN-Sp S에 비해 앞섰다. 테바트론 충돌가속기는 마지막 남은 t-쿼크를 1995년 발견했다. 당시 페르미 연구소는 4 개의 팀이 각기 다른 방식으로 t-쿼크를 탐색하고 있었는데, 그 중 CDF팀⁹³⁾과 D0팀⁹⁴⁾이 t-쿼크를 발견하는데 성공했다.

양성자 충돌가속기로 분류하기는 어렵지만, 앞서의 논의에 포함되지 않은 가속기들이 몇 개 더 있다. 독일 DESY의 HERA(Hadron-Electron Ring Accelerator), CERN의 LHC(Large Hadron Collider), BNL의 RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider) 등이 그들이다. HERA는 DESY의 DORIS, PETRA에 이은 3 세대 가속기로 6.3km 둘레의 원형 링을 이용해서 820 GeV의 양성자와 27.6 GeV의 전자 또는 양전자를 충돌시키는 장치이다. 양성자의 내부구조를 탐색하는 것이 HERA의 주된 임무이다. CERN의 LHC는 2004년 완공을 목표로 건설 중인데, 기존의 LEP 링을 이용해서 전자와 양전자 대신에 양성자와 반양성자 충돌장치로 개조하고 있다. LHC이 예상하고 있는 질량중심계 에너지는 14TeV로 테바트론의 7배인데, 양성자뿐만이 아니라 중핵(heavy ion)들의 충돌실험도 실시할 예정으로 있다. LHC가 완공되면 인류가 경험하지 못한 새로운 에너지 영역에서 어떤 예기치 못한 실험결과를 얻을 수 있을지 물리학자들은 많은 기대를 걸고 있다. BNL의 RHIC는 1999년 완공될 예정인데, 중핵을 각기 100GeV의 에너지로 충돌시켜 대폭발(Big Bang) 후 초기 우주 상태에 존재했을 것으로 추측되는 쿼크-글루온 플라스마(quark-gluon plasma) 상태를 연구하는 것이 제작의 가장 큰 목적이다. 또 하나의 중요한 연구 과제는 양성자의 스핀구조에 관한 것이다. 최근, 양성자의 스핀을 세 개의 쿼크의 스핀만으로 설명이 불가능함이 밝혀져,⁹⁵⁾ 쿼크 이외에 글루온, 바다-쿼크(sea quark), 또는 이러한 것들이 조합된 입자들에 의한 스핀구조를 연구할 계획이다.

Associated Energy at $\sqrt{s} = 540$ GeV," *Phys. Lett.* 122B (1983) 103. UA2 collaboration; M. Banner *et al.*, "Observation of Single Isolated Electrons of High Transverse Momentum in Events with Missing Transverse Energy at the CERN pp Collider," *Phys. Lett.* 122B (1983) 476.

93) UA1 collaboration; G. Arnison *et al.*, "Experimental Observation of Lepton Pairs of Invariant Mass Around 95 GeV at the CERN SPS Collider," *Phys. Lett.* 126B (1983) 398. U2 Collaboration; P. Bagnaia *et al.*, "Evidence for $Z \rightarrow e^+e^-$ at the CERN pp Collider" *Phys. Lett.* 129B (1983) 130.

94) CDF collaboration; F. Abe *et al.*, "Evidence for Top Quark Production in p Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV," *Phys. Rev. D* 50 (1994) 2906. CDF collaboration; F. Abe *et al.*, "Observation of Top Quark Production in pp Collisions," *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 2626.

95) D0 collaboration; S. Abachi *et al.*, "Observation of Top Quark," *Phys. Lett.* 74 (1995) 2632.

96) EMC Collaboration; J. G. Ashman *et al.*, "A Measurement of the Spin Asymmetry and Determination of the Structure Function g_1 in Deep Inelastic Muon-Proton Scattering," *Phys. Lett.* 206B (1988) 364.

• 표 5. 양성자 충돌가속기

1971: CERN ISR 31GeV+31GeV

횡방향 파이온제트(1973), Λ_c (1981)

1981: CERN Sp̄pS(Super p̄p Synchrotron) 270GeV+270GeV

W^+ (1983), Z^0 (1983)

1989: Fermilab Tevatron collider 1TeV+1TeV,

t-쿼크(1995)

1992: HERA, DESY, 820GeV(양성자)+27.6 GeV(전자 또는 양전자).

1999: RHIC 완공예정, 100GeV+100GeV

2004: LHC 완공예정, 7TeV+7TeV.

5. 가속기와 표준모형

앞 절에서 우리는 가속기의 대략적인 발전과정과 함께, 가속기가 발견한 많은 입자들 중에서 표준 모형의 정립 및 확인과 관련된 입자들을 살펴보았다. 이 절에서는 이를 바탕으로 표준모형이 정립되고 확인되는 과정을 살펴본다.

먼저 파이온이 발견되기 전인 1940대 후반에 알려진 입자들을 정리해 보자. 전자, 양전자, 양성자, 중성자, 뮤온, 그리고 당시에 발견되지는 않았지만 페르미(Enrico Fermi)가 예언했던 중성미자가 전부였다. 물론, 양전자가 전자의 반입자이듯, 다른 입자들도 그들의 반입자를 가지고 있을 것으로 생각했다. 양성자는 반입자이고, 중성미자는 아직 발견되지 않았으므로, 이들을 제외하면, 당시에 알려진 물질계의 근본입자는 모두 4 개가 된다. 전자, 양성자, 그리고 중성자는 원자를 구성하는 입자이고, 뮤온은 유카와가 예언했던 핵력을 전달하는 입자⁹⁷⁾로 생각했으므로, 이들 입자들은 자연에 존재해야 할 충분한 이유가 있었다. 발견되지는 않았지만 중성미자도 베타붕괴를 일으키는 약상호작용과 관련된 입자로 자연을 구성하는데 필요한 존재였다.

1947년 우주선에서 발견된 파이온(π^+)은 당시의 물리학자들이 이해하고 있던 물질 세계의 모형에 일대 혼란을 가져온 중대한 사건이었다. 존재의 이유를 알지 못하는 입자가 처음으로 출현했기 때문이었다. 1949년 뮤온은 강상호작용의 영향을 받지 않는 경입자이며 파이온이 유카와 입자임이 밝혀져 파이온의 존재 이유는 알려 졌지만, 이번에는 뮤온이 문제가 되었다.⁹⁸⁾ 곧이어 발견된 여러 V-입자들에 의해 혼란은 가중되어 갔다. 현재까지 발견된 중간자와 경입자의 수는 각각 160여 개와 230여 개이다. 이는 단지 확인된 입자의 수가 그렇다는 것뿐이다. 물리이론에 따르면 강입자의 수는 무한해야 한다. 오늘날 물리학자들은 무한한 수의 강입자가 단 6개의 쿼크를 이용해서 설명될 수 있다고 생각하고 있다. 강입자의 쿼크모형이 그것이다.

97) H. Yukawa, "On the Interaction of Elementary Particles," *Proc. Phys. Math. Soc. Jap.* 17 (1935) 48.

98) M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, "On the Disintegration of Negative Mesons," *Phys. Rev.* 71 (1947) 209, C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. E. Powell, "Processes Involving Charged Mesons," *Nature* 159 (1947) 694.

5-1 쿼크모형 이전의 입자물리학

먼저 쿼크모형이 등장한 1964년 이전의 상황을 정리해 보자. 1950년도를 전후해서 파이온을 필두로 여러 새로운 입자들이 우주선과 가속기를 통해 발견되기 시작했다는 것을 우리는 앞에서 살펴본 바 있다. 입자의 수가 급속히 증가하자 당시의 물리학자들은 이러한 예상치 못했던 현상에 매우 당혹했다. 물질의 근본입자의 존재여부에 회의론을 가지는 물리학자도 등장했다. 예를 들면 츠(Geoffrey F. Chew)와 같은 물리학자는 물질의 최소단위는 존재하지 않으며, 모든 입자는 본질적으로 동등하다는 S-행렬(S-Matrix) 또는 구두끈 가설(bootstrap hypothesis)이라 불린 이론을 제안하기도 했다.⁹⁹⁾ 하지만, 대다수의 물리학자들은 원자론적 시각을 견지하고 있었다.

강입자의 구조에 관해서 주목할 만한 첫 번째 모형은 1949년 페르미(Enrico Fermi)와 양(C. N. Yang)이 제안한 소위 페르미-양 모형(Fermi-Yang model)이었다.¹⁰⁰⁾ 이들은 양성자와 중성자를 근본 입자로 취급하고, 파이온을 양성자와 중성자 그리고 그들의 반입자로 기술하는 모형을 제안했다.¹⁰¹⁾ 이는 당시의 물리학자들이 양성자와 중성자를 근본입자로 생각했다는 사실을 알려 준다. 그러나, 파이온을 복합입자로 취급한 것은 당시로서는 상당히 파격적인 제안이었다. 이 모형은 파이온이 자신보다 훨씬 무거운 입자들로 이루어져 있다는 단점을 가지고 있었지만, 파이온의 전하량, 아이소스핀(isospin), 반전성(parity), 스핀(spin) 등의 양자수를 잘 설명할 수 있었다.¹⁰²⁾ 이는 우연의 일치이긴 했으나, 만약 파이온이 두 개의 입자로 구성된 하부구조를 가지고 있다면 그들이 가져야 하는 여러 양자수에 관한 힌트를 제공해 주는 역할을 했다는 점에서 의미를 찾을 수 있겠다.

페르미-양 모형에서 쿼크모형으로 이어지는 과정을 살펴보면, 물리학자들이 자연을 정복해 나가는 전형적인 과정을 이해하는데 많은 도움이 된다. 1950년대의 물리학자들은 새로이 발견된 입자들을 물리적 특성에 따라 분류하는 작업으로부터 이해의 돌파구를 열었다. 입자의 질량, 전하량, 스핀, 평균수명, 붕괴방식 등이 입자를 분류하는 기준이 될 수 있었다. 일단 핵자보다 가벼운 입자는 중간자, 핵자보다 무거운 입자는 중입자일 가능성이 컸다. 또 스핀이 정수인 보손(boson)이면 중간자, 반정수(half-integer)인 페르미온(fermion)이면 중입자로 볼 수 있었고, 수명이 짧으면 강력에 의해 붕괴하고, 이보다 길면 전기력, 그 보다 더 길면 약력에 붕괴하는 입자 등으로 어느 정도 분류가 가능했다. 하지만, 입자를 분류할 수 있는 명확한 기준을 찾는 것이 쉬운 일이 아니었다. 보편적인 입자 분류법이 자리 잡은 것은 나카노(Nakano)-니시지마(Nishijima)-겔만(Gell-Mann) 공식(NNG-공식)이 등장한 1955년으로 볼 수 있다. 이 공식은 세 양자수, 즉 입자의 전하량(Q), 아이소스핀(isospin)의 z-축 성분 I, 그리고 기묘도(S; strangeness)라 불리는 초전하(hypercharge) 사이에 존재하는 관계를 수식화한 것이다.

$$Q = I_3 + S/2$$

위의 공식을 소개한 이유는 이 공식이 사실상 강입자의 쿼크모형에 이르는 길잡이 역할을 했기 때

99) G. F. Chew and S. C. Frautschi, "Principle of Equivalence for all Strongly Interacting Particles within the S-Matrix Framework," *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 391.

100) 당시 페르미와 양은 시카고 대학의 교수와 학생이었다.

101) $\pi^+ = p\bar{n}$, $\pi^- = \bar{p}n$, $\pi^0 = u\bar{u}$.

102) E. Fermi, C. N. Yang, "Are Mesons Elementary Particles?," *Phys. Rev.* 76 (1949) 1739.

문이다. NNG-공식은 당시에 알려진 입자들 사이에서 발견된 최초의 규칙성이었으며, 쿼크모형은 이 규칙성을 이해하고자 하는 노력의 최종 산물로 볼 수 있다.

먼저, NNG-공식에 3개의 양자수가 포함되어 있는데, 이들이 당시에 입자를 분류하는 기준이 되었다. 이들 중 Q는 입자의 전하량이고, 아이소스핀은 강입자에 부여된 양자수의 하나로, 1932년 하이젠베르크(Werner Heisenberg)¹⁰³⁾에 의해 제안되고, 1936년 카센(B. Cassen)과 콘돈(E. U. Condon)¹⁰⁴⁾에 의해 그 의미가 확장된 양자수로, 강입자의 대칭성에 뿌리를 두고 있다. 기묘도는 1955년 니시지마(Kazuhito Nishijima)¹⁰⁵⁾와 1956년 겔만¹⁰⁶⁾이 V-입자의 성질을 설명하기 위해 도입한 일종의 인위적인 양자수이다. 나중에 겔만에 의해 기묘도는 s-쿼크가 가지는 초전하로서 새로운 의미를 갖게 된다.

기묘한 입자들, 즉 V-입자들은 다음과 같은 두 가지 특징을 가지고 있었다. 하나는 이들이 반드시 쌍으로 생성된다는 사실이었다. 물론 이들이 쌍으로 검출되지 않는 경우도 있었지만, 전기적으로 중성인 입자는 검출되지 않는다는 사실을 감안하면, 여러 상황으로 미루어 보아 이들이 항상 쌍으로 생성되는 것은 분명해 보였다. V-입자의 이러한 성질은 1952년 미국의 파이스(Abraham Pais)¹⁰⁷⁾와 일본의 니시지마¹⁰⁸⁾에 의해 연관생성 이론으로 체계화되었다. 이 이론은 1955년 실험적으로도 검증되었다.¹⁰⁹⁾ 또 하나의 특징은 이들의 수명이 매우 길다는 사실이었다. 이들이 핵력의 영향을 받는 중입자인 것은 분명했는데, 예상되는 중입자들의 수명인 10^{-13} 초보다 훨씬 긴 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ 초 정도의 수명을 가진 것으로 밝혀진 것이다. 사실 연관생성과 긴 수명의 문제는 단지 기묘한 입자들에게만 적용되는 특성이 아니고, 기묘도 이외의 다른 초전하를 가진 입자들에게도 적용되는 일반적인 현상이다. 따라서, 이는 어느 정도 상세히 살펴볼 필요가 있다.

1955년과 1956년 각각 니시지마와 겔만에 의해 도입된 기묘도는 이 같은 V-입자의 특성을 훌륭히 설명해 주었다. 먼저 연관생성을 설명한 다음, 긴 수명 문제를 살펴보기로 한다. 이에 앞서 보존원리와 대칭성의 관계를 간단히 알아보자. 기묘도가 도입된 배경과 이를 이용해서 위의 두 가지 숙제를 푸는 과정을 이해하기 위해서는 보존원리와 대칭성의 관계를 먼저 이해할 필요가 있다. 일반적으로 하나의 대칭성으로부터 하나의 보존원리가 만들어진다. 예를 들면, 전하보존의 법칙은 양전하와 음전하의 대칭성에 뿌리를 두고 있다. 따라서 전하보존의 법칙이 항상 성립한다는 말은 양전하와 음전하가 완벽한 대칭을 이룬다는 말과 동일하다. 반대로 만약 전하가 보존되지 않는다면, 양과 음전하 사이에 대칭성이 완벽하지 않다는 것을 의미한다. 기묘도는 일종의 전하와 같은 개념으로 도입되었다. 실제로 처음에 기묘도를 니시지마는 이타전하(η -charge), 겔만은 대체전하(displaced charge)라 불렀다. 기묘도는 V-입자의 연관생성을 설명하기 위해 도입되었다. 말하자면 전기적으로 중성인 입자가 전하를 띤 입자로 붕괴할 때에는 반드시 쌍으로 붕괴해야 전하보존법칙을 만족시키는 것과 같이, V-입자가 연관생성되는 이유도 어떤 보존해야 할 양자수, 즉 기묘도를 보존하기 위해서라는 설명이 도입되었다. 쌍생성되는 데이터를 분석하여 기묘도 보존법칙에 따라 당시에 알려진 V-입자들에게 각기 적합한 기묘도를 부여하고, 홀로 생성된 경우를 분석하여 Σ^+ 과 Ξ^0 의 존재를 예측했는데, 이들이 모두

103) W. Heisenberg, "On the Structure of Atomic Nuclei", *J. Z. Phys.* 77 (1932) 1.

104) B. Cassen, E. U. Condon, "On Nuclear Forces", *Phys. Rev.* 50 (1936) 846.

105) Kazuhito Nishijima, "Charge Independence Theory of V-Particles," *Prog. of Theor. Phys.* 13 (1955) 285.

106) Murray Gell-mann, "The Interpretation of the New Particles as Displaced Charge Multiplets," *Nuovo Cim. Suppl.* 4 (1956) 848.

107) Abraham Pais, "Some Remarks on the V-Particles," *Phys. Rev.* 86 (1952) 663.

108) Kazuhito Nishijima, *Prog. of Theo. Phys.* 8 (1952) 401.

109) W. D. Walker, "A- $\bar{\Theta}$ Production in π -p Collision at 1 BeV," *Phys. Rev.* 98 (1955) 1407.

베바트론에서 발견되어 기묘도를 이용한 연관생성 이론은 훌륭한 성공을 거두었다.

긴 수명의 문제도 쉽게 풀렸다. 이는 기묘도 보존법칙을 포기함으로써 설명될 수 있었다. 이상해 보일 수도 있지만, 이는 물리학에서 흔히 있는 일이다. 말하자면, 사소한 현상 또는 예외적인 현상은 무시하고, 이를 무시했을 때 성립하는 원리를 먼저 찾고, 어떤 요인에 의해 예외적인 사건이 일어나는지를 설명하는 것이 효율적인 경우가 많기 때문이다. 이 경우 기묘도는 강력에 의해서는 보존되지만, 약력에 의해서는 보존되지 않는다는 가정이 그것이다. V-입자는 강력에 의해 생성되므로, 생성될 때에는 기묘도 보존법칙을 만족시키기 위해 항상 쌍으로 생성된다. 그러나, 일단 생성된 다음에는 주변에 기묘도를 상쇄할 입자가 없기 때문에 강력으로 붕괴하지 못하고 약력으로 붕괴한다고 설명으로, V-입자의 긴 수명도 설명되었다.

보존원리의 붕괴는 물리학에서 대칭성의 파괴와 동등한 의미를 가진다. 다음에 살펴보겠지만, 약력은 자연의 대칭성을 파괴하는 특수한 능력을 가진 힘이며, 현재와 같은 물질세계가 존재할 수 있었던 이유도 자연의 대칭성의 파괴에서 찾아 볼 수 있다. 약력과 관련된 내용은 다음에 W^+ 와 Z^0 을 논할 때 살펴보기로 한다.

NGG-공식의 또 다른 공헌은 1956년 사카다(Shoichi Sakada)의 사카다 모형¹¹⁰⁾을 탄생시킨 것인데, 이 모형은 NGG-공식과 쿼크모형 사이에서 일종의 징검다리 역할을 했다. 사카다는 페르미와 양이 근본입자로 제안했던 양성자와 중성자에 람다입자를 더하여, 세 개의 입자 즉 (p, n, Λ)와 그 반입자들의 조합으로 중간자와 중입자의 구조를 설명하고자 했다. 람다가 새로 포함된 것은 물론 기묘도를 고려하기 위해서였다. 또 람다는 붕괴방식이 중성자와 비슷할 뿐만 아니라¹¹¹⁾, 1953년에 양성자, 중성자, 그리고 람다로 구성되어 있는 긴 수명의 하이퍼핵(hypernucleus)이 발견되었기 때문에,¹¹²⁾ 람다를 당시 근본입자로 알고 있었던 양성자와 중성자와 동격으로 해석하는 견해가 등장했기 때문이었다.

사카다모형은 NGG-공식을 훌륭하게 설명했다. 물론 사카다모형은 그른 것이었지만, 만약에 강입자가 세 개의 근본입자로 구성되어 있다면, 그들이 가져야 하는 아이소스핀과 기묘도를 정확히 알려주는 매우 중요한 역할을 했다. 한편, 사카다는 쿼크모형에서와 같이 중간자를 입자-반입자 쌍으로 기술했다¹¹³⁾. 중입자는 그 입자의 붕괴방식을 고려하여 중간자와 중입자의 결합을 이용해서 설명했다. 예를 들면, Σ^- 는 Λ 와 π^- 로 붕괴하므로, $\Sigma^- = \Lambda \pi^- = \Lambda p \bar{n}$ 으로 구성되어 있다고 제안했다.

사카다모형은 $SU(3)$ ¹¹⁴⁾ 그룹이론을 이용한 접근을 탄생시켰다. 1959년 일본의 이케다(M. Ikeda), 오가와(S. Ogawa), 그리고 오누키(Y. Ohnuki)는 사카다모형을 기초로 하는 $SU(3)$ 이론을 발표했다.¹¹⁵⁾ 이 이론의 핵심은 양성자, 중성자, 그리고 람다 사이의 차이를 무시하고 이들이 이루는 대칭성을 바탕으로, 강입자의 구조를 설명하는 것이었다. 이들은 자신들의 이론을 중간자에 적용시켜 당시에 발견되지 않은 n -중간자의 존재를 예언했는데, 이 입자가 1961년 베바트론에서 발견됨에 따라,¹¹⁶⁾ $SU(3)$ 접근방식에 관심을 모으는 계기가 되었다. 하지만, 이들의 이론은 중간자에 대한 설명에는 성공했지만, 중입자를 설명하는데 실패했다. 사실 이들의 시도는 납원자의 구조를 금원자를 이용해 설

110) S. Sakada, "On a Composite Model for New Particles," *Prog. of Theor. Phys.* 16 (1956) 686.

111) 이들은 다음과 같이 베타붕괴한다. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, $\Lambda \rightarrow p + \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

112) M. Danysz, J. Pniewski, "Delayed Disintegration of a Heavy Nuclear Fragment," *Phil. Mag.* 44 (1953) 348.

113) 예를 들면, $K^+ = p\bar{\Lambda}$, $K^- = n\bar{\Lambda}$.

114) Special Unitary Group in three dimensions라고 읽는다.

115) M. Ikeda, S. Ogawa, Y. Ohnuki, "A Possible Symmetry in Sakada's Model for Mesons-Baryons System," *Prog. of Theor. Phys.* 22 (1959) 715.

116) 주 50 참조.

명하는 것과 다를 바가 전혀 없었기 때문이었다.

NNG-공식에 숨어 있는 비밀을 정확히 파악해 낸 사람은 겔만¹¹⁷⁾과 니만(Yuval Ne'eman)¹¹⁸⁾이었다. 이전의 물리학자들이 양성자, 중성자, 람다 등의 물리적 실체에 양자수를 연관시킨 대칭성에 집착한 반면, 이들은 특정한 입자를 무시하고 전하량, 아이소스핀, 그리고 기묘도의 양자수만을 고려하는 SU(3) 모형을 1961년 발표했다. 소위 팔정도(the eightfold way) 모형이 그것이다. 이들 이용해 당시에 알려진 입자들을 분류해 보니, 당시에 전하가 -1, 아이소스핀이 0, 그리고 기묘도가 -3인 중입자가 빈칸으로 남아 있었다. 겔만은 그 문제의 입자를 그리스 알파벳의 마지막 글자인 오메가를 붙여 Ω 라고 명명하고 그 존재를 예측했다. 겔만의 모형은 양자수 놀음에 불과하다는 비판을 받기도 했지만, Ω 가 1964년 BNL-AGS에서 발견되자¹¹⁹⁾ 정당성을 인정받게 된다.

지금까지의 논의를 정리하면, 당시까지 발견된 강입자들에게 합당한 양자수를 결정하고, 이를 기준으로 이들이 모두 명확한 규칙에 따라 정돈될 수 있다는 것을 발견하는 과정으로 요약될 수 있다. 이들이 특정한 규칙을 따른다는 사실은 모두 같은 입자들로 이루어진 하부구조를 가지고 있다는 사실을 의미했다. 이외에도 강입자들이 복합입자라는 증거가 있었는데, 그 중 특기할 만한 것은 강입자들이 공명상태(resonance)를 갖는다는 사실이었다. 1952년 페르미가 이끄는 시카고 싸이클로트론 팀은 핵자의 공명상태인 Δ -입자를 발견했다.¹²⁰⁾ 중간자들의 공명상태도 발견되었다. 1961년에 발견된 ρ -중간자¹²¹⁾과 ω -중간자¹²²⁾, 그리고 1962년에 발견된 ϕ -중간자¹²³⁾ 등이 그것이다. 강입자의 공명상태가 존재한다는 것은 그들의 하부구조가 존재한다는 명확한 증거였다.

이제 자연스럽게 모든 강입자를 구성하는 입자에 관한 모형이 등장할 차례가 되었다. 이케다의 SU(3) 접근이 실패한 원인이 하나의 힌트가 되었다. 그것은 근본입자들은 이미 알려진 입자들이 아니라, 한 단계 더 아래에서 찾아야 한다는 사실을 의미했다. Ω 가 발견된 1964년 겔만은 모든 강입자는 3개의 쿼크, 즉 u(up) 쿼크, d(down) 쿼크, 그리고 s(strange) 쿼크로 이루어져 있다는 쿼크모형을 제안했다.¹²⁴⁾ 같은 해에 이스라엘 사람인 쯔바이크(George Zweig)도 세 개의 에이스(ace)를 근본입자로 하는 모형을 제안했다.¹²⁵⁾ 쯔바이크는 이 논문을 발표하는 과정, 그리고 발표 후에도 여러 어려움을 겪었다고 고백하고 있다.¹²⁶⁾ 오늘날에도 쿼크모형을 못마땅하게 생각하는 물리학자들이 없지 않은 사실을 감안하면, 당시에 쿼크모형에 대한 반응을 짐작하는 것은 그리 어렵지 않을 것이다.

만약, 쿼크모형이 사실이라면 강입자는 모두 3개의 쿼크로 이루어져 있으므로, 1964년 당시 모든 물질은 3개의 쿼크와 그때까지 알려진 경입자들 즉 전자, 전자중성미자, 뮤온, 뮤온중성미자, 즉 모두 7개의 입자와 그들의 반입자들로 구성된 것이 된다. 전자중성미자¹²⁷⁾와 뮤온중성미자¹²⁸⁾는 각각 1953

117) Murray Gell-Mann, "The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry," *CNSI-20* (1961).

118) Yuval Ne'eman, "Derivation of Strong Interactions from a Gauge Invariance", *Nucl. Phys.* 26 (1961) 222.

119) 주 61 참조.

120) H. L. Anderson *et al.*, "Total Cross Sections of Negative Pion in Hydrogen," *Phys. Rev.* 85 (1952) 934. H. L. Anderson, E. Fermi, E. A. Long, D. E. Nagle, "Total Cross Sections of Positive Pions in Hydrogen," *Phys. Rev.* 85 (1952) 936.

121) 주 42 참조.

122) 주 51 참조.

123) 주 60 참조.

124) Murray Gell-Mann, "A Schematic Model for Baryons and Mesons," *Phys. Lett.* 8 (1964) 214.

125) George Zweig, "An SU(3) Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking I," *CERN-8182-TH-401* (1964).

126) Harald Fritzsch, *Quarks*, (New York: BasicBooks, 1983) p. 75.

127) R. Reines, C. L. Cowan, "Detection of Free Neutrino," *Phys. Rev.* 92 (1953) 830.

년과 1962년에 발견되었다.

5-2 쿼크모형과 양자색역학

1964년 쿼크모형이 등장했지만 처음에는 이를 진지하게 받아 들였던 물리학자들은 많지 않았다. 여러 가지 가능한 현상론적 접근 중 하나일 뿐으로 생각했다. 가장 큰 이유는 쿼크들이 부분전하를 가진다는 가정 때문이었다. 부분전하의 존재 가능성에 거의 모든 물리학자들은 회의적이었으며, 이런 무모한 모형을 제안한 겔만과 쓰바이크를 비롯한 물리학자도 적지 있었다. 겔만 자신도 쿼크모형을 하나의 가능한 수학적 모형으로 여겼으며, 물리적 실재성에는 커다란 비중을 두지 않았다고 한다.

쿼크모형이 불만족스러운 것은 누구에게나 마찬가지였으나, 이 모형이 알려진 현상을 설명해 주는 이상, 이 모형의 진위 여부를 확인하는 것은 물리학자들의 의무가 되었다. 이에 따라 쿼크의 존재를 확인하는 실험이 시작되었으며, 쿼크모형을 기초로 하는 새로운 이론들도 나타나 1973년 오늘날과 같은 양자색역학(quantum chromodynamics, 이하 QCD)의 형태로 완성되었다.

먼저, 실험적 증거를 확보하는 과정을 살펴 본 다음에, 이론적 진전을 정리해 보도록 하자. 처음으로 쿼크의 실험적 증거가 확보된 것은 1969년으로, SLAC에서 수행된 고에너지 전자-핵자 충돌실험을 통해서였다. 1969년에 보르켄(Bjorken)이 경입자와 핵자사이의 충돌실험을 통해 핵자의 하부구조를 분석할 수 있는 보르켄 스케일링(Bjorken scaling) 이론을 발표하여¹²⁹⁾, 전자-핵자 충돌을 통해 핵자의 하부구조를 연구할 수 있는 이론적 토대가 마련되었다. 즉, 쿼크를 점전하로 간주하고 운동량 및 에너지 전달에 의존하는 핵자의 형태인자(nucleon form-factor)를 유도했던 것이다. 같은 해에 프리드만(H. D. Friedman), 켄달(H. W. Kendall), 그리고 테일러(R. E. Taylor) 등은 전자-양성자 충돌실험에서, 해석이 약간 애매한 실험결과를 얻었다.¹³⁰⁾ 그들은 부분전하를 띤 세 개의 입자가 양성자 안에 존재하는데, 이들이 가진 운동량을 모두 합해도 양성자의 전체 운동량에 미치지 못한다는 사실을 발견했다. 만약, 양성자가 세 개의 입자만으로 구성되어 있다면, 그들의 운동량을 합한 값은 양성자의 운동량과 같아야만 했다. 따라서, 실험결과와 해석을 두고 약간의 문제가 발생했다.

이 실험 결과는 파인만(Richard Feynman)의 파톤모형(partonic model)을 탄생시켰다. 파인만은 이 실험결과를 다음과 같이 해석했다. 양성자가 하부구조를 가진 것을 분명하고, 물론 그도 쿼크모형을 알고 있었지만, 세 개의 쿼크만으로 실험결과를 설명할 수 없었으므로, 양성자 내부에 존재하는 모든 입자를 총칭하는 의미로 파톤이라는 용어를 사용했다.¹³¹⁾ 쿼크 이외의 입자는 전자가 존재를 감지할 수 없는 중성입자, 즉 글루온(gluon)이었다. 같은 해에 보르켄은 파인만의 파톤모형을 이용해 위의 실험결과가 점전하와 같은 파톤에 의한 결과라는 해석을 내놓았다.¹³²⁾ 이 논문에서 이들은 전자의 산

128) C. T. Dandy *et al.*, "Observation of High Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrino," *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36.

129) J. D. Bjorken, "Asymptotic Sum Rules at Infinite Momentum," *Phys. Rev.* 179 (1969) 1517.

130) E. D. Bloom *et al.*, "High Energy Inelastic e-p Scattering at 6 and 100," *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 930, M. Breidenbach *et al.*, "Observed Behavior of Highly Inelastic Electron-Proton Scattering," *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 935.

131) Richard P. Feynman, "Very High Energy Collisions of Hadrons," *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 1415.

132) J. D. Bjorken, E. A. Paschos, "Inelastic e-p and γ p Scattering and the Structure of the Nucleon," *Phys. Rev.* 185 (1969) 1975.

란단면적(Cross-section)이 서로 비간섭적인 성분의 합(incoherent sum)으로 나타내어질 수 있다는 것을 보였는데, 이는 핵자의 하부구조가 존재한다는 증거였다.

한편, CERN과 Fermilab에서 행해진 중성미자-핵자 충돌실험에서도 스케일링이 확인되었다. 전자(뮤온) 중성미자가 핵자 내부의 쿼크와 충돌하면, 역베타붕괴 반응이 일어나 u-쿼크가 d-쿼크로 변환되면서 전자(뮤온)가 방출된다. 이 실험은 쿼크의 존재 여부뿐만 아니라 약력의 본질과도 관련된 중요한 실험이었다. 1973년에 발표된 실험결과는 여러 사실을 알려주었다. 쿼크의 존재를 확인해 주었으며, 쿼크가 약전하(weak charge)의 근원임도 알려주었다. 그리고 중성미자가 하전 경입자로 변환되지 않는 현상, 즉 중성미자가 쿼크에 충돌하고도 그대로 튕겨나는 것을 처음으로 관측했는데, 이는 중성미자와 쿼크사이에 전하의 교환을 동반하지 않는 상호작용, 즉 중성전류가 존재한다는 것을 알려주는 중요한 실험이었다.¹³³⁾ 이 발견이 있기 전까지는 베타붕괴에서와 같이 전하의 교환이 일어나는 약상호작용만이 알려져 있었다.

수많은 경입자-핵자의 충돌실험을 통해, 핵자의 내부에 부분전하를 가진 점과 같은(pointlike) 페르미온들이 존재한다는 사실이 명확해 졌다. 그러나 그들이 껍만의 쿼크인지에 관한 논란은 지속되었다. 쿼크모형이 확고히 받아들여진 것은, 잠시 후에 살펴보겠지만, 쿼크모형에 바탕을 둔 이론들이 소개되고 이들이 예언한 새로운 쿼크, 즉 c-쿼크가 발견된 1974년이다.

이제 이론적 진전들을 살펴보자. 쿼크모형이 제안된 다음 해인 1965년에 한(M. Y. Han)과 남부(Y. Nambu)¹³⁴⁾, 그리고 보고리보프(N. N. Bogolyubov) 등¹³⁵⁾은 쿼크에 색양자수(color quantum number)라는 새로운 양자수를 도입시켰다. 페르미온인 Δ^{++} -입자의 스핀과 아이소스핀을 배타원리(exclusion principle)를 만족시키면서 설명하기 위해서는 새로운 양자수의 도입이 불가피했기 때문이었다. 색양자수는 쿼크모형이 QCD로 이어지는 첫 번째 연결고리였다. 그러나 이들은 중입자가 세 개의 입자로 구성된 하부구조를 가지고 있다는 것은 인정했지만, 껍만이 제안한 쿼크는 받아들여지는 않았는데, 이는 쿼크모형에 대한 당시의 반응을 알려 주는 일면이라 하겠다. 이들은 분수전하를 가진 쿼크가 아니라 단위 전하를 가진 세 구성입자를 제안했다. 그럼에도 불구하고 색양자수의 개념에 도달할 수 있었던 것은 배타율이 전하량과는 관련이 없고 스핀과 아이소스핀에만 관계된 물리량이기 때문이었다. 또, 남부는 1966년 강력을 전달하는 양-밀(Yang-Mills) 방식의 게이지 보존¹³⁶⁾, 즉 벡터 중간자(vector boson)¹³⁷⁾의 존재를 제안하는 논문을 발표했다.¹³⁸⁾ 또 그린버그(O. W. Greenberg)와 즈완지거(D. Zwanziger)는 오늘날의 QCD의 기초가 되는 논문을 발표했다.¹³⁹⁾

색양자수의 징후는 Δ^{++} 이외에도 다른 실험에서도 나타났다. 하나는 π^0 의 수명이 이론치보다 9배 짧다는 사실이었다.¹⁴⁰⁾ 이 문제는 하나의 쿼크에 세 개의 색양자수를 결합시키면, 3(쿼크)×3(반쿼

133) F. J. Hasert *et al.*, "Search for Elastic Muon-neutrino Electron Scattering," *Phys. Lett.* 46B (1973) 121, "Observation of Neutrino-like Interactions Without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment," *Phys. Lett.* 46B (1973) 138.

134) M. Y. Han, Y. Nambu, "Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry," *Phys. Rev.* 139 (1965) B1006.

135) N. N. Bogolyubov, B. V. Struminsky, A. N. Tavkhelidze, "On the Composite Models in Theories of Elementary Particles," *JINR-D-1698* (1965).

136) C. N. Yang, R. L. Mills, "Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance," *Phys. Rev.* 96 (1954) 191.

137) Spin이 1이며 Parity가 -인 보존을 말한다.

138) Y. Nambu, "A Systematics of Hadrons in Subnuclear Physics," *Preludes in Theoretical Physics in honor of V. H. Weisskopf*, eds. by A. De-Shalit *et al.* (Amsterdam: North-Holland, 1966) 133.

139) O. W. Greenberg, D. Zwanziger, "Saturation in Triplet Models of Hadron," *Phys. Rev.* 150 (1966) 1177.

140) R. G. Glasser, N. Seeman, B. Stiller, "Mean Lifetime of the Neutral Pion," *Phys. Rev.* 123 (1961) 1014.

크)=9, 즉 붕괴할 확률이 9배 커지므로 설명이 가능했다.¹⁴¹⁾ 또 하나는 2~3 GeV사이에서 전자와 반전자가 쌍소멸(e^+e^- annihilation)된 다음에 강입자로 붕괴하는 확률과 뮤온-반뮤온 쌍으로 붕괴하는 확률의 비가 거의 일정하다는 실험결과였다. 이론적으로는 이 에너지 영역에서의 붕괴확률은 전하량의 제곱에 비례하는데, 강입자로 붕괴하는 확률이 계산치 보다 3배 높았다. 이는 가상광자(virtual photon)가 쿼크로 붕괴할 모드(mode)가 하나가 아니라 세 가지라는 증거였다. 즉, 하나의 쿼크가 세 가지 색깔상태를 가진다고 가정하면 풀리는 문제였다.¹⁴²⁾

색양자수의 개념의 함께, 오늘날의 표준모형에서 핵심적인 위치를 차지하고 있는 경입자와 쿼크의 세대라는 개념이 탄생했다. 이는 새로운 쿼크의 존재를 예언하는 기초가 되었다는 점에서 매우 중요한 진전이었다. 1964년 보르켄(J. B. Bjorken)과 글라쇼(S. L. Glashow)는 약상호작용에서 나타나는 경입자와 중입자 사이의 대칭성을 고려하여, 새로운 양자수인 참양자수(charm quantum number)를 가진 참입자(charmed particle)가 존재할 것이라는 요지의 논문을 발표했다.¹⁴³⁾ 전자와 전자중성미자(e, ν_e), 그리고 뮤온과 뮤온중성미자(μ, ν_μ)가 쌍을 이루는 것과 같이, 강입자의 구성입자들도 쌍으로 구성되어 있을 것으로 유추한 것이다. 쉽게 말하자면, 경입자가 4개이니, 강입자의 근본입자의 수도 하나 더 있어야 한다는 것이었다. 하지만, 이들은 겔만의 쿼크모형이 아니라 이케다의 SU(3) 이론을 확장한 SU(4) 이론을 통해 이 같은 결론에 도달했다. 즉, 이들은 정수전하를 가진 근본입자를 가정했었다.

오늘날과 같은 형태의 양자색역학(quantum chromodynamics, 이하 QCD)이 완성된 것은 1970년대 초반이다. 1969년 SLAC에서 발견한 스케일링은 물리학자들이 쿼크의 실재성을 인정케 하는 계기가 되었다. 예를 들면, 1970년 글라쇼는 마음을 바꿔 쿼크를 받아들이고, 자신이 착안한 세대라는 개념을 이용해 참쿼크의 존재를 예측했다.¹⁴⁴⁾ 1973년은 QCD가 완성된 해로 볼 수 있다. 이 해에 오늘날의 QCD와 직결된 중요한 논문들이 와인버그¹⁴⁵⁾, 겔만과 프리트쉬(H. Fritzsch) 그리고 로타일러(H. Leutwyler)¹⁴⁶⁾, 또 그로스(D. J. Gross)와 윌첵(F. Wilczek)¹⁴⁷⁾ 등에 의해 독립적으로 발표되었다.

1973년에 정립된 QCD의 기본골격은 다음과 같다. 강력의 근원은 쿼크의 색전하(color charge)이며, 강력은 쿼크의 색깔을 바꾸어 주는 힘으로 8개의 색전달자(color carrier), 즉 글루온에 의해 전달된다. 색전하에는 R(red), G(green), B(blue)의 세 가지 종류가 있다. 관측 가능한 입자는 모두 색깔이 없는 무색입자(colorless particle)인데, 이를 위해서는 중간자는 예를 들면 $R\bar{R}$ 과 같은 색깔-반색깔, 중입자는 RGB 또는 $\bar{R}\bar{G}\bar{B}$ 와 같이 모든 색깔을 포함해야 한다. 쿼크는 단독으로 존재할 수 없다는 이론적 제약 때문에 직접적인 검출은 불가능하지만, 쿼크가 존재한다는 가장 강력한 증거는 쿼크제트라 불리는 중입자 분출현상이다. 이는 1975년 처음으로 발견되었으며, 이와 함께 1979년 발견된 글루온 제트는 QCD의 정당성을 강화시켰다. 당시는 물론 자유쿼크의 존재를 탐구하는 연구가 많이 진행되었으나, 아직까지 자유쿼크를 발견했다는 결정적인 실험증거는 없다.¹⁴⁸⁾

141) Donald H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, (London: Addison-Wesley, 1982) 75.

142) 앞의 책, p. 305.

143) J. B. Bjorken, S. L. Glashow, "Elementary Particles and SU(4)," *Phys. Lett.* 11 (1964) 255.

144) S. L. Glashow, J. Iliopoulos, I. Maiani, "Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry," *Phys. Rev. D* 2 (1970) 1285.

145) Steven Weinberg, "Non-Abelian Gauge Theories of the Strong Interactions," *Phys. Rev. Lett.* 31 (1973) 494.

146) Harald Fritzsch, Murray Gell-Mann, H. Leutwyler, "Advantages of the Color Octet Gluon Picture," *Phys. Lett.* 47B (1973) 365.

147) D. J. Gross, F. Wilczek, "Asymptotically Free Gauge Theories," *Phys. Rev. D* 8 (1973) 3635.

오늘날의 양자색역학의 골격이 1973년경에 완성되기는 했지만, 물리학자들은 여전히 쿼크모형에 대한 의심을 완전히 거두지 않았다. 그러나 다음 해인 1974년 소위 11월 혁명(November Revolution)이라 불리는 물리학의 역사상 획기적인 발견이 이루어지면서, 쿼크모형의 신뢰도가 크게 제고된다. 참쿼크와 반참쿼크로 이루어진 J/Ψ -입자가 발견된 것이다.

5-3 11월 혁명과 표준모형

J/Ψ -입자의 징후를 처음으로 발견한 사람은 부룩헤이븐연구소의 레더만(Leon Lederman) 팀이었다. 1970년경 레더만은 양성자-핵자의 충돌 후에 나타나는 뮤온-반뮤온($\mu\bar{\mu}$) 쌍의 에너지와 운동량을 분석하여 새로운 벡터중간자를 찾는 실험을 진행 중이었다. 그는 약 3GeV 부근에서 어떤 공명상태를 관측했지만, 관측장치의 분해능(resolving power)이 낮았던 관계로 그 공명상태의 정확한 정체를 확인하지는 못했다.

J/Ψ 의 존재는 1974년 11월에 부룩헤이븐과 스탠포드에서 거의 동시에 검출되었다. 먼저, L의 텅(Samuel Ting)이 이끄는 팀은 양성자를 베릴륨 핵에 충돌시킨 후 생성되는 전자-반전자(e^-e^+) 쌍이 가지는 에너지와 운동량을 분석하여 새로운 벡터 중간자의 존재를 탐색하고 있었다. 그들은 에너지 스펙트럼에서 전자-반전자 쌍의 에너지의 합이 3.1GeV가 되는 지점에서 공명의 반폭(half-width)이 0.1MeV 정도에 불과한 매우 발달된 피크를 발견했다.¹⁴⁸⁾ 평균수명이 약 10^{-20} 초인 입자인데, 이는 3.1GeV의 질량을 가진 입자에겐 매우 긴 수명이었다. 텅은 중국식 자기 이름을 붙여 이 입자를 J입자로 명명했다.¹⁴⁹⁾

스탠포드의 SPEAR에서 리히터(Burton Richter) 팀은 부룩헤이븐 팀과 반대로 전자와 반전자를 쌍소멸(pair annihilation)시켜 나타나는 공명상태를 관측하다가 역시 3.1GeV 부근에서 피크를 발견했다.¹⁵⁰⁾ 그는 이 입자가 기포상자(bubble chamber)에서 그리는 궤적의 모양이 그리스 문자 Ψ 를 닮았다고 해서 이 입자를 Ψ 라 명명했다. 그리고 같은 실험을 통해 소련의 ADONE 가속기에서도 이 입자의 존재가 확인되었다.¹⁵¹⁾

이 입자는 1971년 글라쇼가 예언했던 참쿼크와 반참쿼크로 구성된 차모니움(charmonium, $c\bar{c}$)이었다. 차모니움의 다른 공명상태들(η_c, Ψ', χ)도 발견되었다¹⁵²⁾. 곧이어 c-쿼크를 포함하는 참중간자와 참중입자가 발견되었다. 1976년에 c-쿼크와 u-쿼크의 조합인 $D(\bar{u}c)$ -중간자¹⁵³⁾와 c-쿼크와 d-쿼크의 조합인 $D^+(\bar{d}c)$ -중간자와 $D^-(\bar{c}d)$ -중간자¹⁵⁴⁾가 스탠포드의 SPEAR에서, 1977년에는 c-쿼크와 s-쿼크

148) Lawrence W. Jones, "A Review of Quark Search Experiment," *Rev. Mod. Phys.* 49 (1977) 717.

149) 주 62 참조.

150) 한자의 J .

151) J. E. Augustin *et al.*, "Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1406.

152) C. Bacci *et al.*, "Preliminary Result of Frascati(ADONE) on the Nature of a New 3.1GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1408.

153) G. S. Abrams *et al.*, "The Discovery of a Second Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 33 (1974) 1453.

154) G. Goldhaber *et al.*, "Observation in e^+e^- Annihilation of a Narrow State at 1865 MeV, c^- Decaying to $K\pi$ and $K\pi\pi$," *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 255.

155) I. Peruzzi *et al.*, "Observation of a Narrow Charged State at 1876 MeV c^- Decaying to an Exotic Combination of $K\pi\pi$," *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 569.

로 이루어진 $D_s^-(s\bar{c})$ -중간자¹⁵⁶⁾가 독일의 DESY에서 발견되었다. 또, D_s -중간자가 D -중간자로 붕괴하는 반응¹⁵⁷⁾에 관한 연구는 세대의 개념을 보다 확고히 해주는 공헌을 했다. 참강입자인 $\bar{\Lambda}^-(uds)$ 도 1976년에 페르미연구소에서 발견되었다.¹⁵⁸⁾

차모니움과 참중간자, 참중입자, 그리고 이들의 공명상태가 모두 발견되자, 쿼크모형은 강입자는 훌륭히 기술하는 이론적 발판으로 확고히 인정받게 되었을 뿐만 아니라, QCD의 연구에 박차가 가해지는 계기가 되었다. 그 계기가 된 1974년 11월에 있었던 J/ψ 입자의 발견을 11월 혁명이라 부른다. 1974년은 표준모형이라는 이름이 탄생한 해이기도 하다. 일리오포로스(John Iliopoulos)는 1974년 한 학회에서의 발표에서 당시까지의 입자물리학의 진전을 표준모형이라는 이름으로 정리한 후, 이 용어가 일반화되기 시작했다.

그리고 1975년과 1979년에 발견된 쿼크제트(quark jet)와¹⁵⁹⁾ 글루온제트(gluon jet)는¹⁶⁰⁾ 쿼크모형에 기초한 QCD의 정당성을 한층 보강해 주었다.

5-4 타우온과 제 3세대 입자

참쿼크의 발견으로 쿼크의 수는 모두 4 개가 되었다. 1975년까지 알려진 경입자의 수도 모두 4개였으므로, 경입자와 쿼크의 대칭성에 문제가 없는 듯 보였다. (e, νe)와 (d, u)가 1세대 입자, 그리고 이보다 무거운 (μ, νμ)와 (c, s)가 2세대를 이루어 조화로운 대칭관계가 성립했다. 그러나, 1975년 무려 질량이 1.8GeV나 되는 새로운 경입자 타우온(τ)이 발견되면서, 그러한 대칭성에 근거해 제 3세대 쿼크의 존재가 예측되었고, 1977년 b-쿼크, 그리고 1994년 마지막 남은 t-쿼크가 발견되어 쿼크사냥에 종지부를 찍었다.

타우온은 1975년 스탠포드 대학의 SPEAR에서 발견되었다. 펄(M. L. Perl)이 이끄는 연구팀은 전자와 반전자가 쌍소멸된 후에 나타나는 뮤온과 전자의 에너지를 분석한 결과 에너지와 운동량이 보존되지 않는 붕괴 사실을 발견했다.¹⁶¹⁾ 적어도 다른 입자가 2개 더 있어야만, 에너지와 운동량이 보존될 수 있었다. 다음 해인 1976년 그들은 보다 정밀한 실험을 통해 $e^+e^- \rightarrow e^+\mu^- + \text{missing energy}$ 의 반응은 쌍생성된 어떤 입자가 붕괴하면서 나타난다는 가설을 제안했다.¹⁶²⁾ 또 다음 해인 1977년에는 그 입자를 타우온(τ)이라 명명하고 타우온의 성질에 관한 논문을 발표했다.¹⁶³⁾ 타우온과 함께 방출될 것으로 짐작되는 타우중성미자(ντ)의 존재는 아직까지 직접적으로 확인되지 못하고 있다.¹⁶⁴⁾

다섯 번째 쿼크인 b-쿼크는 c-쿼크의 발견을 아깝게 놓친 레더맨에 의해 1977년에 발견되었다. 레더맨은 페르미연구소의 500GeV-PS가 완공되자 BNL에서 Fermilab으로 자리를 옮겨 과거와 같은 실험을 하고 있었다. 즉, 양성자-핵자 충돌 후에 나타나는 뮤온 쌍의 에너지와 운동량을 분석하여, 새로

156) DASP Collaboration; R. Brandelik *et al.*, "Evidence for the F Meson," *Phys. Lett.* 70B (1977) 132.

157) $c^- \rightarrow s^- + e^- + \bar{\nu}_e$.

158) B. Knapp *et al.*, "Observation of a Narrow Anti-Baryon State at 2.26GeV c⁻¹," *Phys. Rev. Lett.* 37 (1976) 882.

159) 주 82 참조.

160) 주 86 참조.

161) M. L. Perl *et al.*, "Evidence for Anomalous Lepton Production in e⁺e⁻ Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 35 (1975) 1489.

162) M. L. Perl *et al.*, "Properties of Anomalous eμ Events Produced in e⁺e⁻ Annihilation," *Phys. Lett.* 63B (1976) 466.

163) M. L. Perl *et al.*, "Properties of the Proposed τ Charged Lepton," *Phys. Lett.* 70B (1977) 487.

164) 타우온은 다음과 같이 타우중성미자를 방출하며 붕괴하는 것으로 추측된다. $\tau \rightarrow \mu(e) + \nu_\tau(\nu_e) + \nu_\tau$.

은 벡터중간자를 탐색하고 있었다. 레더만 팀은 약 9.5GeV 부근에서 하나의 공명상태를 발견했다.¹⁶⁵⁾ 이 입자는 읍실론(γ)으로 명명되었다.¹⁶⁶⁾ 그런데 레더만의 실험만으로는 새로운 입자의 증거가 확실치 않았다. 레더만의 실험은 여러 가지 가능성이 모두 포함된 포괄적인(Inclusive) 데이터였기 때문이었다. 읍실론만의 배타적인(exclusive) 실험결과가 필요했다. 순수한 이 실험을 위해 DESY의 전자가속능력이 4GeV에서 5GeV로 개선되었다. 다음 해인 1978년 독일의 DESY의 전자-반전자 충돌장치는 9.46GeV에서 읍실론 공명을 관측했으며, u-쿼크, s-쿼크와 같이 전하량이 $-1/3$ 인 b-쿼크와 그 반입자로 이루어진 입자라는 사실도 확인했다.¹⁶⁷⁾ 읍실론은 차모니움($c\bar{c}$)과 같은 구조를 가진 바토모니움($b\bar{b}$)이었다.

이어 탐쿼크의 경우와 마찬가지로, 바토모니움의 공명상태가 1980년에 코넬대학에서 발견되었고,¹⁶⁸⁾ 1981년에는 B-중간자¹⁶⁹⁾와 B-중입자(Λ_b)¹⁷⁰⁾의 존재가 각각 코넬과 CERN에서 확인되었다.

곧이어 t-쿼크를 탐색하는 작업에 돌입했으나, t-쿼크가 발견되기 전에 SLAC과 CERN에서 표준모형과 관련된 매우 획기적인 실험적 사실이 발견되었다. SLAC-SLC¹⁷¹⁾와 CERN-LEP¹⁷²⁾는 제 4세대 입자군의 존재 여부를 확인하기 위한 실험을 진행하고 있었는데, 각각 1989년과 1991년에 Z'-보존의 붕괴를 분석하여 중성미자의 수는 3 개라는 실험결과를 발표했다. 현재의 표준모형에서 가정하고 있는 경입자-쿼크 사이의 대칭성이 성립한다면, 더 이상의 쿼크는 존재하지 않는다는 증거가 되는 중요한 실험이었다.

이 같은 실험결과는 t-쿼크의 발견에 보다 높은 의미를 부여했다. 차모니움인 J/ Ψ 입자의 질량이 3.1GeV, 바토모니움인 γ 이 9.46GeV이므로 만약 타보니움(Toponium)이 있다면 대략 질량이 27GeV 정도인 것으로 예상하는 사람이 있었으나, 그 부근에서는 탐쿼크의 징후를 발견할 수가 없었다. 1984년에 CERN-Spp̄S에서 W⁺가 발견되면서, 이것이 t-쿼크와 과 b-쿼크로 붕괴한다는 오해가 잠깐 있기도 했다. 탐쿼크의 징후는 1994년 페르미연구소의 테바트론 충돌기에서 처음으로 검출되었으며,¹⁷³⁾

165) S. W. Herb et al., "Observation of a Dimuon Resonance at 9.5GeV in 400 GeV Proton-Nucleus Collision," *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977) 252.

166) 이 입자를 γ 이라 부른 것은 달리 부를 그리스 문자가 남아 있지 않았었기 때문이라 한다. Leon Lederman, "The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?" (New York: A Delta Book: 1994)

167) PLUTO collaboration; C. Berger et al., "Observation of a Narrow Resonance Formed in e^+e^- Annihilation at 9.46GeV," *Phys. Lett.* 39 (1977) 252.

168) CLEO Collaboration; D. Andrews et al., "Observation of Three Upsilon States," *Phys. Rev. Lett.* 44 (1980) 1108, T. Bohringer et al., "Observation of γ , γ' and γ'' at the Cornell Electron Storage Ring," *Phys. Rev. Lett.* 44 (1980) 1111.

169) CLEO collaboration; C. Bebek et al., "Evidence for New Flavor Production at the $\gamma(4S)$," *Phys. Rev. Lett.* 46 (1981) 84. CLEO Collaboration; K. Chadwick et al., "Decay of B-flavored Hadrons th Single-Muon and Dimuon Final States," *Phys. Rev. Lett.* 46 (1981) 88.

170) M. Basile et al., "Evidence for a New Particle with Naked Beauty and for its Associated Production in High-Energy (pp) Interactions," *Lett. Nuovo Cim.* 31 (1981) 97, UA1 Collaboration; C. Albajar et al., "First Observation of the Beauty Baryon Λ_b in the Decay Channel $\Lambda_b \rightarrow J/\Psi(1S) + A$ at the CERN Proton-Antiproton Collider," *Phys. Lett.* 273B (1991) 540.

171) Mark II Collaboration; G. S. Abrams et al., "Measurement of Z'-Boson Resonance Parameters in e^+e^- Annihilation," *Phys. Rev. Lett.* 63 (1989) 2173.

172) DELPHI collaborations; P. Abreu et al., "Determination of Z' Response Parameters and Couplings from its Hadronic and Leptonic Decays," *Nucl. Phys.* B367 (1991) 511. ALEPH collaboration; D. Decamp et al., "Improved Measurement of Electroweak Parameters from Z' Decays into Fermion Pairs," *Z. Phys.* C53 (1992) 1.

173) CDF collaboration, F. Abe et al., "Evidence for Top Quark Production in pp Collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV," *Phys. Rev.*

1995년 페르미연구소는 t-쿼크의 발견을 공식적으로 선언함으로써,¹⁷⁴⁾ 마침내 쿼크를 찾는 여정이 막을 내렸다.¹⁷⁵⁾

5-5 약력과 게이지 보존

앞서의 논의에서 제외되었던 약력과 관련된 내용을 정리하기로 한다. 약력의 개념은 페르미가 1934년 베타붕괴를 설명하는 과정에 처음 등장했는데,¹⁷⁶⁾ 약력은 처음부터 많은 의문을 던져 주었다. 먼저, 에너지와 운동량을 보존하지 않는 것처럼 보였다. 보아(Niels Bohr)가 미시세계에서는 에너지와 운동량도 확률적으로 보존된다는 가설을 내놓을 정도로 이는 당시에 매우 이해하기 힘든 현상이었다. 파울리가 중성미자의 존재를 가정함으로써 이론적으로는 이해가 가능했으나, 중성미자는 1954년에서야 발견되었으므로 그 실체는 오랫동안 의문으로 남아 있었다.

중성미자가 발견된 후에도 약력은 여전히 많은 수수께끼를 안겨 주었다. 1950년대에 V-입자를 분류하는데 많은 어려움을 겪었던 이유 중 하나는 약력이 가진 대칭성을 무시하는 독특한 성질이었다. 앞서 언급한 바와 같이 아이소스핀, 기묘도 등과 같이 강력과 전자기력에서는 보존되는 양자수가 약력에서는 보존되지 않았다. 하지만, 위의 양자수들은 어느 정도 인위적인 성격을 가지고 있었으므로, 보존되지 않는다고 해서 근본적으로 잘못된 것은 없다. 하지만, 약력이 공간 반전성(parity)마저 보존하지 않는다는 사실은 물리학자들에게 상당한 충격을 주었다.

반전성 비보존은 1950년대 초반에 등장한 소위 τ - θ 수수께끼로 대표되는 V-입자의 붕괴와 관련된 의문에 대한 해답으로 1956년 이(T. D. Lee)와 양(C. N. Yang)에 의해 처음으로 제안되었다. τ - θ 수수께끼는 K^+ 가 붕괴하는 모드와 관련된 의문이었다. K^+ 가 붕괴하는 모드 중 다음의 두 가지를 살펴보자.

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^- \\ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^0 \end{aligned}$$

우변에 나타난 입자들의 운동량과 에너지를 분석하여, 모두 같은 질량을 가진 입자에서 붕괴했다는 사실을 알 수 있었는데, 위의 붕괴와 아래의 붕괴 모드의 반전성은 각기 음(negative)과 양(positive)으로 다르게 나타났다. 당시에는 반전성을 보존되는 양자수로 알고 있었으므로, 이 두 붕괴로부터 질량은 같지만 반전성이 다른 두 개의 입자가 있을 것으로 생각하고, 위와 아래의 붕괴를 일으키는 입자를 각각 τ^+ -입자와 θ^+ -입자라 불렀다. 그러나, 그 질량을 가진 입자는 하나밖에 찾을 수가 없었다. 이를 설명하기 위해 이와 양은 약력이 반전성을 보존되지 않을 수도 있다는 가히 혁명적인 가설을 제안했다.¹⁷⁷⁾ 그렇다면 τ^+ 와 θ^+ 는 동일한 입자일 수 있었던 것이다. 사실 1956년 K^+ , θ^+ , τ^+ 이 모두 같은 입자일 수 있다는 실험적 증거들이 BNL에서 나타나기 시작했다.¹⁷⁸⁾ 다음 해인 1957년 우(C.

D50 (1944) 2066.

174) CDF collaboration; E. Abe *et al.*, "Observation of Top Quark Production in pp Collisions," *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 2626, D0 collaboration; S. Abachi *et al.*, "Observation of the Top Quark," *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 2632.

175) 김수봉, "Top Quark의 발견," 『물리학과 첨단기술』, 1995년 6월호, 40.

176) Enrico Fermi, "Towards the Theory of β -Rays," *Z. Phys.* 88 (1934) 161.

177) T. D. Lee, C. N. Yang, "Question of Parity Conservation in Weak Interactions," *Phys. Rev.* 104 (1956) 254.

S. Wu)¹⁷⁹⁾와 레더먼 팀은¹⁸⁰⁾ 각각 Co의 베타붕괴와 가속기를 이용한 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ 실험에서 베타붕괴시 반전성이 보존되지 않는다는 사실을 실험적으로 증명했다.

반전성 비보존은 좌우대칭이 성립하지 않는다는 자연의 본질과 직결된 매우 충격적인 사건이었다. 대칭성을 증시하는 물리학자들은 이보다 심오한 대칭성을 찾아 전하반전(C)과 공간반전(P)을 곱한 새로운 대칭인 CP-대칭을 시험했으나 역시 보존되지 않는 것으로 확인되었다.¹⁸¹⁾ 현재에는 CP-대칭에 시간반전(T)를 곱한 CPT-대칭을 조사하고 있다.¹⁸²⁾ 물리학자들은 자연이 반드시 보존하는 궁극적인 대칭이 존재할 것으로 생각하고 있다.

약력의 중요한 특징 중 하나는 에너지에 따라 세기가 달라진다는 사실이다. 에너지가 증가하면 약력의 세기가 증가한다. 강력도 적외선 매임(infrared slavery)과 점근적 자유(asymptotic freedom)라 알려진 에너지 의존도를 가지고 있는데, 약력과 반대로 에너지가 커지면 약력의 세기는 작아진다. 약력과 강력의 이러한 에너지 의존도는 전자기력과 약력, 그리고 강력이 고에너지 영역에서는 하나의 힘으로 통일될 수 있다는 중요한 힌트로, 현재 이를 다루는 대통일장이론(Grand Unified Theory: GUT)이 많은 진전을 보이고 있다. GUT는 아직 검증되지 않은 이론이므로 제외키로 하고, 여기에서는 표준모형에 포함된 전자기력과 약력의 통일이론인 와인버그-살람의 모형에 포함된 W^+ 와 Z^0 이 가지는 의미만을 살펴본다.

약력과 전자기력을 통일하고자 하는 시도는 1957년 슈윙거(J. Schwinger)에 의해 시작되었다.¹⁸³⁾ 뒤이은 1961년 글라쇼(Sheldon L. Glashow)는 두 개의 하전백터 보존과 광자(photon)를 게이지 입자로 하는 약력과 전자기력의 통일모형을 제안했다.¹⁸⁴⁾ 3년 후인 1967년 와인버그와 살람은 각기 독립적으로 W^+ 와 Z^0 를 게이지-보존으로 하는 현재와 같은 전기약력(Electroweak force)의 통일이론을 완성했다.

처음에는 약력을 베타붕괴를 일으키는 힘으로만 생각했다. 즉, 쿼크 하나의 전하량이 한 단위(± 1)씩 변하면서, 하전 경입자와 함께 중성미자를 방출하는 반응을 일으키는 힘을 약력으로 정의했다. 그러므로, 약력을 전달하는 게이지 보존은 ± 1 의 전하를 가지고 있어야 했다. W^+ 는 그렇게 도입되었다. 그러나, 전자기력과 약력이 하나로 묶여지기 위해서는 전하의 교환을 가져오지 않는 게이지 보존이 존재할 필요가 있었다. 전자기력은 전달하는 가상광자가 중성입자이기 때문이다. 이를 위해 도입된 것이 Z^0 이다.

그러나, 1967년 와인버그-살람 모형(SM-모형)이 발표되었을 당시에는 전하량의 교환이 일어나지 않는 약상호작용이 발견되지 않았으므로, SM-모형을 확인하기 위해서는 먼저 중성전류(neutral current)가 존재하는지의 여부부터 검증해야 했다. 중성전류의 존재가 발견된 것은 1973년 중성미자-

178) S. Fung, A. Pevsner, D. M. Ritson, R. Mohler, "K⁺ - τ^+ Mass Difference," *Phys. Rev.* 101 (1956) 493, V. L. Fitch, R. Motley, "Mean Life of K⁺ Mesons," *Phys. Rev.* 101 (1956) 496, L. W. Alvarez, F. S. Crawford, M. L. Good, M. L. Stevenson, "Lifetime of K Mesons," *Phys. Rev.* 101 (1956) 503.

179) C. S. Wu, "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay," *Phys. Rev.* 105 (1957) 1413.

180) R. L. Garwin, L. M. Lederman, M. Weinrich, "Observation of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon," *Phys. Rev.* 105 (1957) 1415.

181) J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, "Evidence for the 2π Decay of the K_L Mesons," *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964) 138.

182) R. S. Van Dyck, P. B. Schwinberg, H. G. Dehmelt, "New High Precision Comparison of Electron and Positron g Factors," *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 26.

183) Julian Schwinger, *Ann. Phys.* 2 (1957) 407.

184) S. L. Glashow, "Partial Symmetries of Weak Interactions," *Nucl. Phys.* 22 (1961) 579.

쿼크 실험에서였다. 중성미자가 쿼크에 충돌한 다음 전하교환이 없이 에너지와 운동량만을 전달하는 현상이 발견된 것이다.

1981년 CERN-Sp $\bar{p}$ p가 완성된 후, SM-모형이 예언하는 W^+ 와 Z^0 을 찾는 실험이 본격화되었다. 이들의 질량이 100GeV 정도로 매우 크기 때문에, EPC로는 검출하기가 불가능했다. W^+ 와 Z^0 은 모두 1983년 CERN-Sp $\bar{p}$ p에서 발견되었다. 이들의 질량은 와인버그와 살람이 예언했던 그대로의 질량을 가진 것이 밝혀져, SM-모형은 옳은 모형으로 확인되었다. Z^0 -보존은 일종의 질량을 가진 빛이다. SM-모형은 Z^0 이 가진 질량의 기원을 설명하기 위해 힉스(Higgs)-보존¹⁸⁵⁾의 존재를 가정하고 있는데, 이 입자의 존재를 확인하는 작업이 현재 중요한 과제로 남아 있다.

6. 맺음말

앞에서 우리는 입자가속기의 전반적인 발전과정 및 이를 통해 발견된 입자들과 물리적 사실들을 살펴보고, 이를 바탕으로 물질의 근본구조를 이해하고자 하는 물리학자들의 노력이 표준모형으로 구체화되고, 실험적으로 확인되는 과정을 살펴보았다. 현재까지 표준모형에 포함된 입자들 중에서, 타우중성미자(ν_τ)를 제외한 모든 입자의 존재가 확인되었다. 타우중성미자도 조만간 정체를 드러내리라 생각된다. 표준모형의 정립과 확인과정에서 가장 중심적인 역할을 했던 것은 상호작용에 관한 게이지 이론,¹⁸⁶⁾ 강입자의 쿼크모형, 쿼크와 경입자 사이의 세대라는 개념, 그리고 가속기가 될 것이다.

표준모형이 자연의 본질에 관한 많은 사실을 설명해주고 있지만, 아직까지 더 많은 사실이 의문으로 남아있다.¹⁸⁷⁾ 먼저, 가장 근본적인 문제는 쿼크와 경입자들이 과연 근본입자인지에 대한 의문이다. 물질의 근본에 관한 양과겉질 벗기기가 종결되었다는 명확한 증거는 아직 없다. 또, 제 4세대의 쿼크와 경입자들이 존재할 가능성도 배제할 수 없다. 이들 사실을 확인하기 위해서는 지금보다 높은 에너지의 가속기가 필요하다. 2004년에 완공될 예정인 CERN-LHC가 어떤 실험결과를 보여줄 지 귀추가 주목된다.

그리고 표준모형을 이론적인 측면에서도 결함을 가지고 있다. 표준모형의 가장 큰 약점은 자연에 존재하는 4가지 힘은 하나로 엮어내지 못했다는 점이다. 표준모형에서는 중력, 전기약력, 그리고 강력이 독립적으로 논의되고 있다. 자연의 단순함에서 아름다움을 찾는 물리학자들에게 자연에 하나가 아닌 4가지 힘이 존재한다는 사실은 중대한 의문거리이다. 힘, 즉 상호작용은 입자들 사이에서 자신의 존재를 알리고 정보를 교환해 주는 역할을 한다. 만약 상호작용이 존재하지 않는다면, 입자들은 상호간의 존재를 인식할 수 없으므로, 우주는 상호 인식이 불가능한 허깨비 입자들의 집합이 될 것이다. 따라서, 상호작용이 없이는 우주가 존재할 수 없다.

자연에 4가지 상호작용이 존재한다는 것은 입자들 사이의 정보교환 채널이 4가지란 말이 된다. 의문은 하나면 충분하지 않느냐 하는 것이다. 현재 물리학자들은 우주 초기에는 하나의 힘만이 존재했을 것으로 추측하고 있다. 우주의 진화과정에서 우리가 아직 알 수 없는 자연의 미커니즘

185) P. W. Higgs, "Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields," *Phys. Rev. Lett.* 12 (1964) 132, P. W. Higgs,

"Broken Symmetries and Masses of Gauge Bosons," *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964) 508.

186) A. Salam, J. C. Ward, "On a Gauge Theory of Elementary Interaction," *Nuovo Cim.* 19 (1961) 165.

187) 최기운, "입자물리학의 발전 역사 및 최근 동향," 『물리학과 첨단기술』, 1995년 6월호, 5.

(mechanism)에 의해 하나의 힘이 4가지로 분화되었을 것으로 보고 있다. 이에 관한 연구가 많은 진척을 보이고 있다. 전자기력과 약력은 와인버그와 살람에 의해 전기약력이라는 하나의 힘으로 이미 통일되었고, 전기약력과 강력을 하나로 묶는 대통일장이론(grand unified theory: GUT), 나아가 GUT와 중력을 연결하는 모든 것에 관한 이론(theory of everything: TOE)도 시도되고 있다.

지금까지 자연에 대한 이해는 실험도구의 발전에 많은 도움을 받아 왔다. 그 중에서도 가속기는 인류의 지적 진화에 가장 많은 영향을 미친 과학장치라 할 수 있을 정도로, 자연의 본질에 관한 많은 정보를 우리에게 제공해 주었다. 앞으로 자연에 대한 인간의 이해의 정도는 가속기의 에너지에 달려있다고 해도 과언이 아닐 것이다.