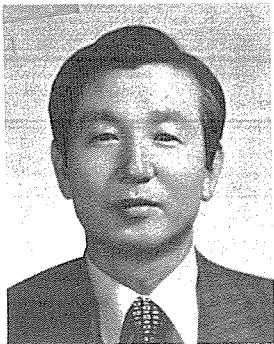


統一論을 指向하는

素粒子 物理学

最新科学



趙炳夏(韓國科學技術院 教授)

1. 素粒子란 무엇이며 그 相互作用은?

물질을 파괴하여 한 없이 細分해 가면 어떻게 될 것인가. 물질을 구성하는 최소 구성단위는 무엇일까. 이와같은 의문에 대한 도전과 연구는 옛날부터 시작되어 오늘에 이르기 까지 지속되고 있다.

물질은 원자로, 원자는 원자핵과 전자로, 원자핵은 중성자와 양성자로 각각 구성되어 있다는 것은 세계 제 2차대전이 시작된 1930년대의 후반기 까지 우리 인간이 이해하고 있었던 물질구조에 대한 知見이라 하겠다.

전자를 원자핵 주변에다 속박시켜 한 원자를 형성시키고 있는 힘은 電磁力이고, 이 힘은 電磁力場의 量子인 光子를 매개로 하여 상호작용한다. 중성자와 양성자를 결부시켜서 한 원자핵을 형성시키고 있는 힘은 核力이며, 이 힘은 핵력장의 양자인 파이中間子를 매개로 해서 상호작용한다. 이 힘은 아주 강하고 짧은 작용거리에서만 작용하므로 強力 또한 강한 상호작용이라고 한다.

특수한 원자핵은 자발적으로 베타붕괴를 일으켜 핵 안에 있는 중성자는 양성자로 轉化하는 동시에 전자와 중성미자를 방출하는 붕괴현상을 야기한다. 이 붕괴를 지배하는 힘은 아주 약하고 그 작용거리는 짧다. 따라서 우리는 이 힘을 弱力 또는 약한 상호작용이라고 하며, 弱力場의 양자인 W[±], Z 입자에 의해서 그 힘이 매개된다고 생각된다.

電磁力, 強力, 弱力은 微視世界를 지배하는 基本力이며, 重力은 巨視世界를 지배하는 基本力이다. 이들 4대기본력을 비교해 보면 다음 표와 같다.

힘	강 력	전자력	약 력	중 력
세 기	1	10 ⁻²	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴⁰
작용거리	10 ⁻¹³ cm	∞	10 ⁻¹⁴ cm이하	∞

(단, 강력의 세기를 1로한 경우)

표 1 : 네가지 힘의 비교

양성자, 중성자, 전자 및 중성미자등은 물질의 素材이고, 중간자, 광자 및 W^{\pm}, Z 등은 물질의 接着材이다. 粒子(질량은 같고 荷電부호만 반대인 입자, 즉 反粒子 포함)들 사이에 상호전환을 기술하는 이론으로 相對論的量子場論이 定立되었다. 특히 전자와 광자의 상호작용을 기술하는 이론을 量子電磁力学(Quantum electrodynamics; QED)이라 하며 성공적인 성과를 가져왔다.

1945년에 대전은 끝나고 학문연구도 부활되었다. 특히 高에너지 입자 가속기와 그 주변 측정기기의 진보에 힘입어 전전에 이론적으로 예언되었던 입자들의 발견은 물론이고, 새로운 입자들도 속속 발견되었다. 우주선연구에서도 새로운 입자가 많이 발견되어 종류수는 크게 증가되었다.

여기에서 전자, 양성자, 중성자, 중성미자, 광자, 중간자와 같은 전전부터 원자나 원자핵의 구성요소라고 알고 있던 옛 입자들과 전후에 발견된 새로운 입자들을 총칭해서 「素粒子」(elementary particle)라고 命名했었다. 「素」라는 형용사는 흰 명주의 布地라는 原義에서 바탕이 되는 것, 원료가 되는 것, 본질이 되는 것으로 그 뜻이 轉義된 것이며, 素粒子란 물질의 微視構造에서 기본素單位가 되는 實體를 뜻한다.

오늘날 이른바 素粒子的 수는 150여종에 달하고 反粒子까지 셈하면 배나 된다. 이들 모두가 동등한 「素」라고 생각되기는 어렵다는 생각이 들기도 한다. 그어느 때에는 90여종의 원자는 分割不能인 基材라고 믿어졌으나, 이제는 그 화학적특성은 단 한가지의 素子인 電子의 집합체로서의 성질로서 원리적으로 解明되었다. 또한 300여종의 안정한 原子核의 정적인 특성은 두 가지의 素子인 양성자와 중성자의 집합체로서의 성질로서 원리적으로 解明되었다.

원자와 원자핵의 구조가 역학적으로 규명되기에 앞서 원소의 주기율과 원자핵의 성질에 관한 규칙성이 밝혀진것과 같이, 素粒子를 비교 분류하여 그들 사이의 系統關係를 분명히 할 필요가 있는 것이다.

強 粒 子 (hadron)	中間子 (Meson)	π^+, π^-, π^0 K^+, K^0, \bar{K}^0, K^- η^0 ρ^+, ρ^-, ρ^0 ω
	重粒子 (Baryon)	P(양성자) η (중성자) Λ^0 $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$
非強粒子	弱粒子 (lepton)	e^- (전자) e^+ (양전자) μ^+, μ^- τ^+, τ^- (?) $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ (?)
	기 타	γ (광자) g (중력자) (?)

표 2. 〈주요「素」粒子的 표〉

일반적으로, 강입자는 강력, 전자력 및 약력의 세가지 작용을 할 수 있고, 약입자 중에서 전자, 뮤온, 타우 입자들은 전자력과 약력을, 중성미자는 약력만을, 광자는 전자력만을, 중력자는 중력만을 작용할 수 있다. 화학에서 Bond 개념과 비슷하게 생각해서 강입자는 세가지의 작용「팔」을 지니고 있고, 다른 입자들은 둘 또는 하나만 갖고 있다. 다음 그림은 입자별 작용팔을 표시해서 그 성질을 개념적으로 표시한 것이다.

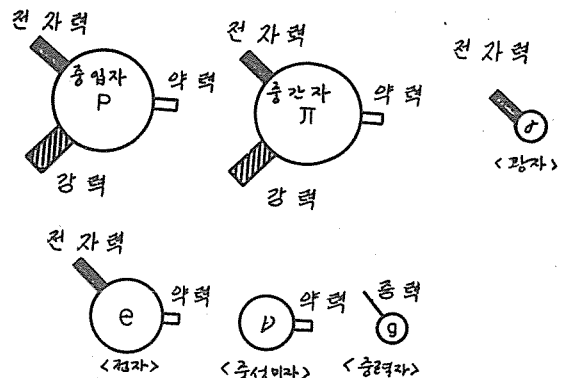


그림 1. 「素」 粒子的 作用 「팔」

素粒子는 個性을 지니고 있을 뿐만 아니라 서로 다른 입자로 옮겨가는 轉化性도 함께 갖고 있다. 우리들이 살고 있는 집의 個性이 番地數라는 指標에 의해서 同定되는 것과 같이, 素粒子의 개체성은 量子數(Quantum Number)에 의해서 同定된다. 양자수에는 質量, 스핀, 偶奇性(Parity) 등과 같은 時空量子數와, 粒子數, 荷電, Strangeness 및 Charm 등과 같이 時空間하고 관계가 없는 이른바 内部量子數가 있다. 따라서, 素粒子는 세가지의 時空量子數와 네가지의 内部量子數, 즉 도합 7종의 量子數에 의해서 그 동일성이 확인되는 物質構造에서의 素單位의인 實在를 말한다.

2 : Quark의 假說과 對稱性

1960년대에 접어들어 입자가속기의 출력이 높아짐에 따라 중성자와 양성자등과 고속전자의 충돌실험이 가능해 졌다.

이 실험에서 중성자와 양성자는 구조가 없는 단순한 질점이 아니고 내부구조를 갖고 있는 複合粒子일 것이라는 조짐이 나타났다. 이 같은 실험사실을 배경으로하여 중성자와 양성자 뿐만 아니라 強粒子 모두가 「素」粒子가 아니라 複合粒子라고 보는 假說이 제창되었고, 그 構成子는 Quark라고 명명되었다.

즉 3종의 Quark가 가정되어, 中間子는 Quark와 反Quark의 複合體이고, 重粒子는 세가지의 Quark의 複合體라고 간주되었다. Quark의 複合體인 強粒子라 하면, 이 複合系에 대해서도 物理的表現의 하나인 Pauli의 禁制律은 성립되어야 할 것이다. 이 律의 적용이 가능해지기 위해서는 Quark는 새로운 세가지의 독립적인 自由度가 필요하게 된다. 이 자유도를 편의상 “色”이라고 부르고 있다. 三種三色이니 이것은 三種三類에 해당한다. 種에 상당하는 것을 우리는 편의상 “香”이라고 부르고 있으니, 「三香三色」의 Quark라고 해도 무방하다.

스핀과 偶奇性和 같은 時空量子數는 같고, 内部量子數는 서로 다른 粒子들의 類綠關係를 분명히 해주는 對稱性을 발견한 것은 큰 성과이다. 특히 SU(3) 대칭성이 유명하며, 이것을 八正道對稱性이라고 부르기도 한다. 3은 三香을

香	色	電荷	重粒子數
u	U _r 赤	+2/3	+1/3
	U _y 黃		
	U _b 青		
d	d _r 赤	-1/3	+1/3
	d _y 黃		
	d _b 青		
s	S _r 赤	-1/3	+1/3
	S _y 黃		
	S _b 青		

표 3 : QuARK의 性質 : 三「香」三「色」

뜻하고 S는 특별을, U는 Unitary를 각각 뜻한다. 이 SU(3)는 群論에서 얻어진 것이다.

内部量子數는 같고 時空量子數가 서로 다른 粒子들 사이에는 간단한 비례관계가 성립하며, 이것을 Regge 軌跡이라 한다. 이 사실과 대칭성과의 상관관계는 아직 분명하지 않다.

1970년대에 와서 Quark의 종류는 늘어나, 四香三色으로, 더 증가되어 6香三色으로, 확장되어, 이른바 SU(4)……SU(6)까지 논의되고 있다. 현재까지 가상적으로 도입된 Quark의 존재가 실증되지는 않았으나 그 유효성은 충분히 입증되고 있다. Quark와 Quark 사이에 작용하는 힘을 媒介해 주는 量子로서 Gluon이 가정되어 있다. 強力을 기술하는 理論체계를 갖지 못해서 고민하고 있던 처지에, Quark의 「香」과 「色」 그리고 Gluon으로서 그 다양한 현상을 통일적으로 설명해 주는 이론이 등장했다. 이것을 우리들은 量子色力學(Quantumchromodynamics)이라고 하며, 간단히 QCD라고도 한다. 엄밀히 말하면 이는 Non-Abelian Gauge Theory이다.

3. 統一論을 指向하여

物理学은 자연의 물리현상을 단순한 하나의 이론으로서 다양한 현상들을 설명하기 위한 勞作活動이라고 할 수 있다. 물질구성의 多重的인 階層性에 따라 因果律이 決定論的으로 적용되거나 또는 確率論的으로 적용되기는 하지만 統

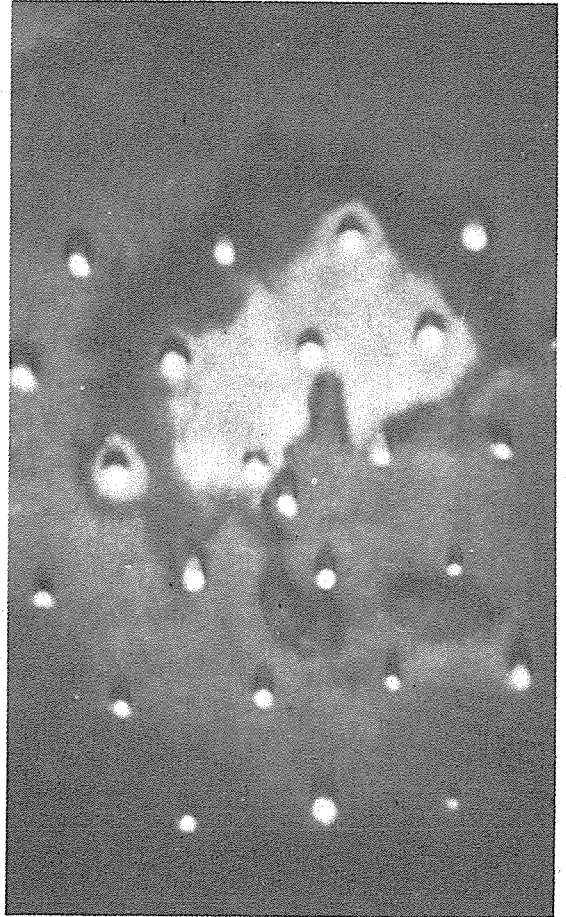
一論을 지향하고 있다.

17세기에 Newton이 발견한 重力(万有引力)에 의해서 지구상에서의 물체의 운동과 天空에서의 天体の 운동이 통일되었으며, 이는 최초의 統一論이었다. 이 이론은 오늘날 APOLO계획에 의해 사람이 달까지 宇宙船을 이용해서 왕복하는 데 성공 함으로써 결정적으로 입증되었다. 19세기에 Maxwell은 電氣力과 磁氣力은 서로 겉보기에 다를 뿐 그 본질은 같은 것이라, 이른바 電磁力으로 통일한 것은 제 2의 統一論이었다. 오늘날의 라디오, TV, 레이더등 電磁文明의 利器의 기본원리가 되어 있는 것이다. 20세기초에 Einstein은 重力과 電磁力을 통일시키려고 평생을 두고 노력하였으나 성공하지 못하였고, 오늘까지 그 누구도 이일을 성취하지 못하고 있는 실정이다.

20세기 후반, 즉 1967년에 S. Weinberg와 A. Salam은 각자 독립적으로 電磁力과 弱力을 電磁弱力으로 통일하는데 성공하였다. 1978년 日本 東京에서 개최된 제19회 高에너지 物理学 國際會議에서 실험적인 지지를 얻어, 이들에게 1980년에 노벨물리학상이 시상되었다. 電磁弱力은 바로 인간이 성취한 제 3의 統一力이다. 電磁力은 弱力 보다 약 1,000배나 강한 힘인데도 불구하고 이들 두 힘은 겉보기로만 다를뿐 실은 같은 힘이라는 것이다. 이는 弱力場의 量子인 媒介粒子 W^+ , Z 는 질량이 크고, 그 작용거리가 대단히 짧기 때문이라고 설명하고 있다. W^+ 와 Z 의 존재가 아직 실험에서 검출되지는 않았으나 그 有効性은 간접적으로 입증되고 있다.

統一論을 指向에서 걸어온 物理学의 歷史的인 背景과 統一力의 實証性과 有効性을 감안할 때, 네가지 基本力 즉 重力, 強力, 弱力 및 電磁力의 大統一論이나 電磁弱力과 같은 統一論을 시도해 보는 것은 자연적 추세라 할 수 있다.

이 같은 時勢에 따라 창출된 것에는 超重力理論(Super Gravity)과 超對称性理論(Super



Symmetry)이 대표적인 것이다. 이론적인 테두리가 너무나 커서 비현실적인 요소의 介入余地가 넓어 문제가 많다. 일면 天文学에서 발견된 3K宇宙背景輻射는 宇宙創生에 관한 太初大爆發說(Big Bang)을 지지하고 있다. 이와 관련 지워서 4大基本力은 宇宙進化에 따라 각각 分枝된 것이라고 보는 견해도 있다.

아무튼 20세기 후반과 20세기의 전반에 제 4의 統一力이 발견될 것으로 기대된다. 統一力의 탐구는 物理学者의 꿈이다. 현시점에서 보면素粒子는 광자, 중력자, 약입자(lepton), Gluon 및 Quark이고, lepton과 Quark가 主役이라 하겠다.