



Symmetry Breaking



Symmetry Breaking

물리학에서 Symmetry Breaking은 작은 떨림이 시스템에 작용해서 시스템을 결정하는 현상을 기술한다. 외부 관측자가 알지 못하는 떨림에 대해서 임의로 나타내는데, 이 과정을 소위 “Symmetry Breaking” 이라고 하고, 이러한 변화는 보통 시스템을 무질서한 상태에서부터 특정한 상태로 가져간다. 무질서한 상태가 더 대칭적이란 의미에서, 작은 변화는 전체적인 상태를 변화시키지 않고 Symmetry Breaking을 얻는다.

Symmetry Breaking은 pattern formation에 중요한 역할을 담당할 것으로 예상된다.

특히, Symmetry Breaking은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- ▶ Explicit Symmetry Breaking
- ▶ Spontaneous Symmetry Breaking

Explicit Symmetry Breaking

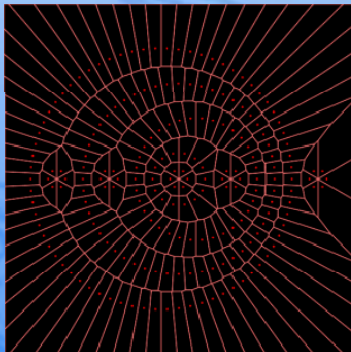
Explicit Symmetry Breaking는 dynamical equation은 symmetry group에서 불변량이 아니라는 것을 암시한다. 이것은 Lagrangian 공식에서 system의 Lagrangian은 하나 또는 그 이상의 symmetry breaking을 포함한다는 것을 의미한다.

Symmetry breaking은 이론/실험을 기반으로한 이론에서 소개되었다. weak interaction의 양자장 이론의 경우에는, 이것은 명백히 mirror symmetry or parity를 위반했다. 이 경우의 결과는 parity non-conservation이 weak interaction에서 있다는 것이고, 처음 예상은 1956년 T.D. Lee and C.N. Yang에 의해서 되었다.

양자장 이론(Quantum field theory)

- 양자장론은 고전장론을 양자화한 것으로 볼 수 있다. 예를 들어, 고전역학에선 맥스웰 이론의 전자기장, 일반상대론의 중력장(계량 텐서) 등 여러 장을 다루는데, 이런 장은 고전적이다. 이를 양자화하여, 장을 연산자 값을 가지게 한다. 맥스웰 이론을 양자화하면 양자전기역학을 얻고, 일반상대론을 양자화하면 여러 가지의 양자 중력 이론을 얻는다.
- 양자장론에서는 이와 같은 상호작용을 다루는 장 이외에 전자나 쿼크 따위의 입자도 장으로 해석한다. 예를 들어, 전자와 양전자는 전자 장의 들뜸으로 나타낸다. 물리학의 오랜 의문 중 하나는 왜 양자수가 같은 두 입자는 절대로 구별할 수 없는지다. 예를 들어, 양자수가 같은 두 뮤온은 모든 면에서 정확히 같고, 어느 실험으로도 구별할 수 없다. 모든 뮤온의 전하와 질량은 정확히 같다. 이에 반해 똑같은 과정을 거쳐 만들어진 두 자동차나 생명체는 비슷해 보이지만 여러 가지 미세한 차이가 있다. 이와 같은 동일함은 서로 다른 시각에 만들어진 입자에도 성립하는데, 예를 들어, 만들어진지 1초가 된 뮤온이나 1년이 지난 뮤온이나 다 남은 평균수명은 정확히 같다. (다시 말해, 입자는 늙지 않는다.) 모든 입자를 해당하는 마당의 들뜸으로 해석하면, 왜 같은 종의 입자가 정확히 같은지 이해할 수 있다. 같은 종의 입자가 같은 이유는 그 입자가 개별적으로 존재하는 것이 아니라, 같은 개체(해당 입자 종의 장)의 일부분이기 때문이다.

mirror symmetry or parity



~~Symmetry breaking은 non-renormalizable effect 때문에 나타날 수도 있다.~~ 물리학자들은 이제 current renormalizable field effect theories를 effective field theories로 보는 좋은 근거를 가지고 있는데, Low-energy 근사를 deeper theory로 한다. non-renormalizable 상호작용의 효과는 작으므로, Low-energy 영역에서 무시할 수 있다. 이렇게 얻은 것은 deeper theory보다 더 대칭을 갖는다. 즉, effective Lagrangian은 대칭성을 따르고, 그것의 이론적 대칭성은 가장 좋은 대칭성은 아니다.

Spontaneous Symmetry Breaking

물리학에서, Spontaneous Symmetry Breaking는 어떤 이론에 대칭이 있으나 바닥 상태는 대칭을 따르지 않는 것을 이야기한다. 대칭 숨김(hidden symmetry)이라고 부르기도 한다.

양자장론에서는 바닥 상태를 진공이라고 부른다. 즉 진공이란 이론의 퍼텐셜(정확히 말하면 유효퍼텐셜)이 최소가 되는 곳을 말한다. 만약 Spontaneous Symmetry Breaking가 일어나는 경우에는 진공이 유일하지 않고, 대칭에 따라 여러가지 진공 상태가 있다. 예를 들면, 이론이 $V(x)=V(-x)$ 라는 대칭(P대칭)을 지니고, 진공 가운데 하나 $x=x_0$ 라면, $x=-x_0$ 역시 진공이다. 깨짐 진공이 연속적인 대칭이라면, 이에 따라 이론은 무한한 수의 진공을 갖는다. 예를 들어 $V(x)=V[x \exp(ia)]$ 와 같은 U(1) 대칭의 경우, 진공은 $x=x_0 \exp(ia)$ 와 같이 연속적으로 분포한다. 이런 경우 “Goldstone's Theorem”에 따라 이론은 무질량 스칼라 보손(Nambu-Goldstone boson)을 갖는다. 만약 깨짐 대칭이 전반적인 대칭이 아니라 “게이지 대칭”이라면, 이 “Nambu-Goldstone boson”은 관측할 수 없고, 대신 “게이지 보손”에 질량을 준다.

난부-골드스톤 보손(Nambu-Goldstone boson)

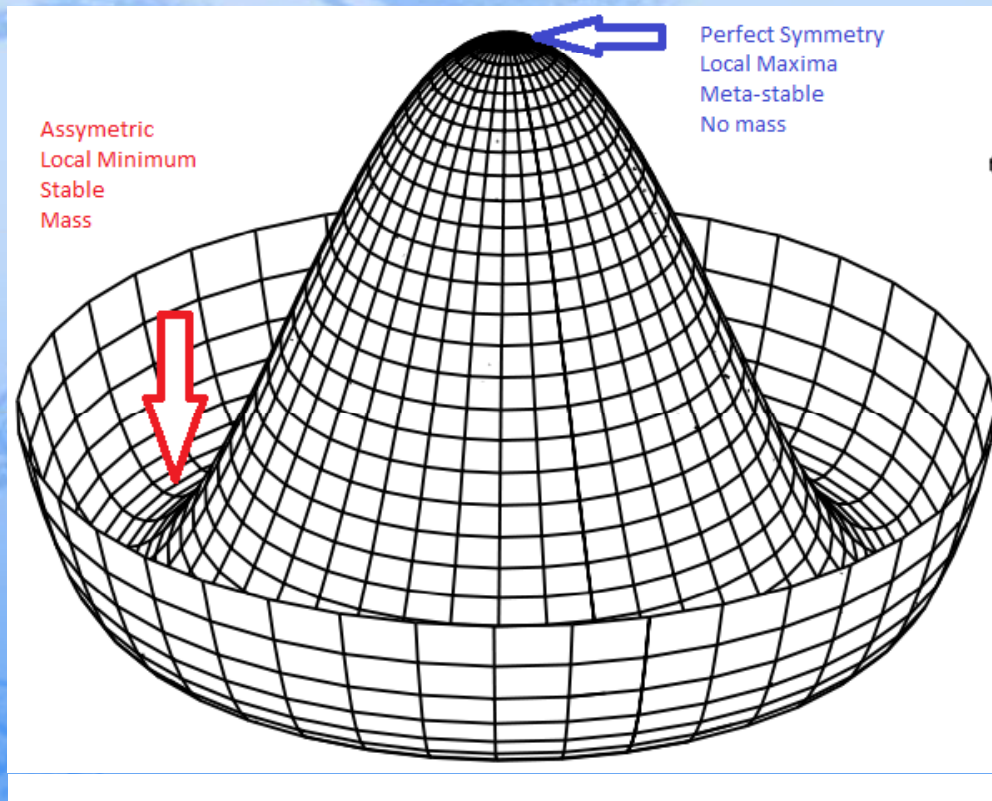
자발대칭파괴를 갖는 이론에서 등장하는 무질량 보손이다. 골드스톤 정리에 따라, 자발대칭파괴가 일어나면 항상 파괴된 대칭의 수 만큼 난부-골드스톤 보손이 존재한다. 난부 요이치로가 BCS 이론을 바탕으로 하여 제안하였고, 이후 제프리 골드스톤에 의해 명료하게 밝혀지고 이후 양자장론의 방식으로 체계적으로 일반화하였다.

표준 모형에서는 질량이 없던 W보손과 Z보손이 난부-골드스톤 보손을 삼켜 질량을 얻는데, 이를 힉스 메커니즘이라고 한다.

만약 대칭성이 정확한 대칭이 아니라 단지 근사 대칭이라면 난부-골드스톤 보손은 작은 양의 질량을 가진다. 대칭이 더 근사적일 수록 그 난부-골드스톤 보손의 질량이 크다. 이런 경우를 유사 난부-골드스톤 보손 (pseudo-Nambu-Goldstone boson)이라고 한다. 예를 들어, 강력의 경우, 위 쿼크와 아래 쿼크를 섞는 아이소스핀이라는 근사적 SU(2) 대칭이 있다. (이 대칭은 위 쿼크와 아래 쿼크가 질량을 가지므로 근사적이다.) 이에 따라 생기는 유사 난부-골드스톤 보손은 파이온으로, 중간자 가운데 질량이 가장 작다.

입자 물리학의 표준 모형에서 W보손과 Z보손은 약한 상호작용을 매개하는 게이지 보손이자 기본입자다. 둘 다 벡터 입자 (스핀 1)다. W보손은 ± 1 의 전하를 갖고, Z보손은 전하를 갖지 않는다.

Spontaneous Symmetry Breaking는 여러 방법으로 일어날 수 있다. 가장 간단한 예는 Lagrangian이 적절한 고전적 포텐셜을 포함하는 경우다. 예를 들어, “힉스 장”에 “멕스코 모자” 포텐셜을 주어 대칭을 깰 수 있다. 고전적 포텐셜 말고도, 순수하게 “복사보정”으로 인하여(양자론적으로) 대칭이 깨질 수 있다. 대표적인 예로 “콜먼 와인버그 모형(Coleman-Weinberg model)”이 있다.



Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	< 2.2 eV	< 0.17 MeV	< 15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] weak force

Bosons (Forces)