

제 11회 137억년 우주의 진화 5강 노트

(박문호 박사님의 강의를 요약 정리한 내용입니다.)

먼저 숫자 몇 개를 암기 합시다.

2.4, 4.8, 1.8, 4.2, 1.27, 173, 104, 106

숫자를 암기 못하면 감이 오지 않는다. 숫자에 약해서 과학을 잘 못한다.

우리 브레인 은 과학을 하기 위해 진화한 것이 아니라 사회적 상호 작용(Sosial interaction)을 위해 진화했다.

사회적 상호작용이 가장 강한 것이 종교와 철학이다. 그 쪽의 특징은 숫자를 사용하지 않는다.

2.4, 4.8, 1.8, 4.2, 1.27, 173, 104, 106

이 숫자를 모르고는 quark세계에 들어갈 수 없다. 이해는 되지만 실체가 몸에 붙지 않는다.

몸에 붙지 않는 상태로 30년 갈 수 있다. 숫자 훈련 밖에 없다.

학문을 한다는 것은 키워드와 숫자를 익히는 것이다. 키워드와 숫자만 있으면 나머지 모든 것은 재 구성할 수 가 있다.

오늘은 quark model을 배운다.

그동안 quark에 관해서 배웠든 모든 것 내려 놓기 바란다. 브레인 친화적인 새로운 버전으로 이야기 하려고 한 다.

제일 중요한 것이 up quark이다. Up quark하나만 알면 된다.

	①	②	③
quark	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{2} \\ RGB \\ 2.4 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{2} \\ RGB \\ 1.27 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{2} \\ RGB \\ 173 \end{matrix}$
Fermion			
lepton	$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} -1 & \frac{1}{2} \\ 0.51 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} -1 & \frac{1}{2} \\ 106 \end{matrix}$	$\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$ $\begin{matrix} -1 & \frac{1}{2} \\ 1.8 \end{matrix}$

U 어깨에 먼저 2/3를 적고 그 옆에 1/2을 적는다. 그 밑에 RGB를 적는다. 마지막에 2.4를 적는다.

UP quark에 대하여 알아야할 모든 것이다.

2/3는 전하량(charge)이다. 1/2은 스핀(spin)이다. RGB는 color charge이다. 2.4는 MeV로 Up quark의 질량이다.

down quark는 전하량 $-1/3$, 스핀 $1/2$, Color charge RGB, 질량 4.8 MeV 이다.

전자(e)는 전하량이 -1 이고 스핀은 $1/2$ 이다. 전자는 lepton이므로 color charge가 없다. 질량은 0.51 MeV 이다.

입자의 속성은 Mass, Charge, Spin 3가지이다. 수 많은 입자들을 이 3가지 속성으로 구분한다.

입자물리학의 입자들의 이 3가지 속성을 연구하는 학문이다.

전자 뉴트리노(ν_e)의 전하량은 제로이고 스핀은 $1/2$ 이다.

스탠다드 모델에서는 전자 뉴트리노(ν_e)의 질량은 제로로 간주한다.

Quark의 상단 up quark, charm quark, top quark의 전하량은 $2/3$ 이고 하단 down quark, strange quark, bottom Quark의 전하량은 $-1/3$ 이다. Lepton의 상단 e, μ, τ 의 전하량은 -1 이며 뉴트리노의 전하량은 모두 0이다.

이상으로 이 세상에 존재하는 입자들 다 끝났다. 우주가 끝났다. 이 4개 밖에 없다.

나머지는 찰나적으로만 존재한다. 우리와 관계없다. 가속기에서 만들 뿐이다.

이 4가지 입자 외에는 지구과학이나 생물학과는 아무 관계도 없다. 나머지 중 가장 오래 존재하는 입자의 수명이 10^{-6} 초이다. 그래서 exotic이라 한다. 기괴하다는 뜻이다.

이들은 질량이 적어서 forever하다. 우주의 최종 산물들이다.

그러나 나머지 입자들이 찰나적으로 사라 졌다고 해서 중요하지 않은 것은 아니다.

여러 번 강조 했지만 지식은 평등하지 않다. 델타평선처럼 되어 있다.

양성자 질량은 938.3 MeV 이다. 중성자는 939.6 MeV 이다. 그런데 Charm quark의 질량은 1.27 GeV 이다.

양성자, 중성자보다 30% 무겁다.

Strange quark의 질량은 104 MeV 이다. Charm quark의 $1/10$ 정도이다. 자연은 예측을 깬다.

뮤온(μ)의 질량은 106 MeV 이다. 전자의 200배이다. 뮤온은 무거운 전자이다.

뮤온 뉴트리노(ν_μ)는 전하량은 -1 이고 스핀은 $1/2$ 이며, 질량은 제로이다.

Top quark은 1993년도에 발견되었다. 페르미 연구소 가속기 테바트론에 의해 발견되었다.

전하량은 $2/3$, 스핀 $1/2$ 그리고 질량은 173 GeV 이다.

이때까지 발견된 소립자 중에 가장 무겁다. 양성자의 180배이다.

Bottom quark는 전하량 $2/3$, 스핀 $1/2$, RGB, 그리고 질량은 4.2 MeV 이다.

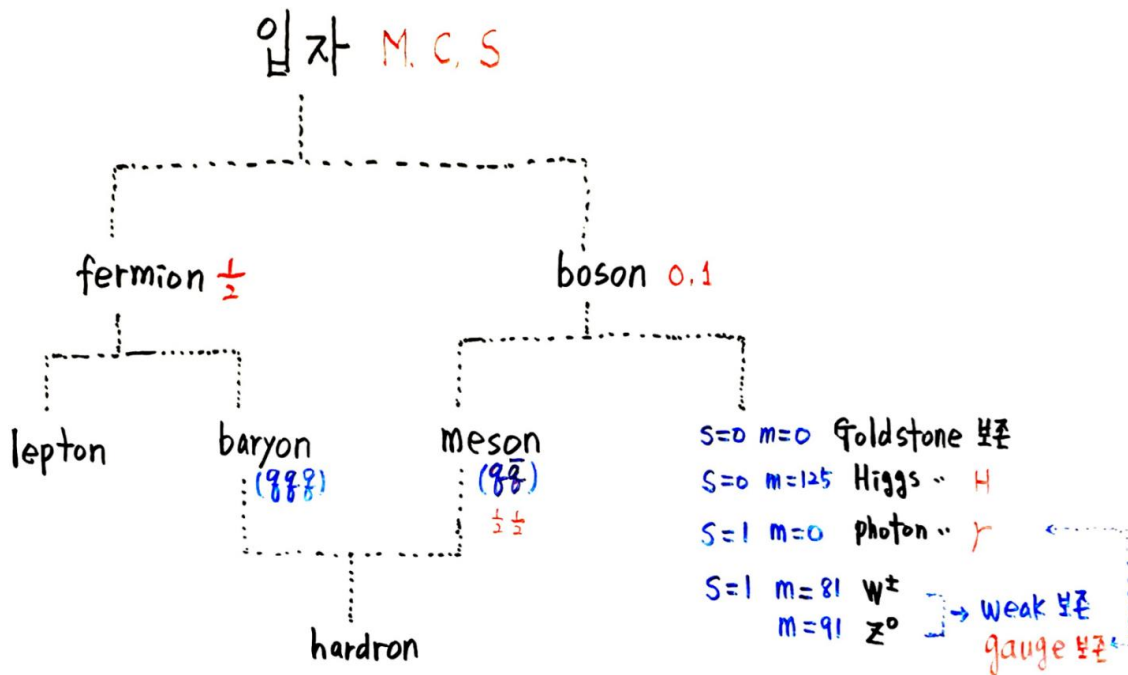
타우(τ) 입자는 전하량 -1 , 스핀 $1/2$, 그리고 질량은 1.8 GeV 이다.

마지막으로 타우 뉴트리노(ν_τ)는 전하량 제로, 스핀 $1/2$, 질량 제로이다.

이 12개 소립자를 Fermion 이라고 부른다. 페르미온은 스핀이 반정수($1/2, 3/2, \dots$)이다.

위 2개 라인을 quark이라고 한다. 밑의 2 라인을 lepton이라고 한다.

세로로 1세대, 2세대, 3세대라 부른다. 1세대만 영원하고 2,3세대는 찰나적이다. 그래서 exotic이라고 한다.



입자는 페르미온과 보존으로 나눈다. 입자의 속성은 mass, charge, spin으로 구분한다.

페르미온은 lepton(경입자)과 baryon(중입자)으로 나누고, boson은 meson(중간자)과 기타 보존으로 나눈다.

보존은 스핀이 정수 값을 갖는다. 0, 1, 2이다 스핀이 2인 보존이 중력자이다.

일본의 유가와 히데끼가 중간자 이론으로 1945년 노벨상을 수상했다.

바리온과 메존을 합하여 하드론(hardron)이라고 한다.

메존은 (q, \bar{q}) 로 구성된다. 반면 바리온은 (q, q, q) 로 구성된다. 쿼크 3개가 결합되어 있다.

메존을 제외한 4가지 보존은 mass와 spin으로 구분한다.

먼저 스핀과 질량이 모두 제로인 보존이 gold stone 보존이다. 실제로 이 세상에는 존재하지 않는다.

그러나 이론상으로는 반드시 출현한다. 힉스 메커니즘에서 대칭이 자발적 붕괴되어 새로운 대칭이 출현할 때 반드시 gold stone보존이 출현한다. 그것을 골드 스톤 정의라고 한다. 골드 스톤 입자를 잡아 먹는 입자가 힉스 입자이다.

두 번째 스핀은 제로이고, 질량은 125 GeV인 보존이 힉스 보존이다. 2012년에 발견되었다.

세 번째 스핀이 1이고 질량이 제로인 보존이 포톤이다.

네 번째 스핀이 1이고 질량이 81 GeV와 91 GeV인 보존이 W^+, W^-, Z^0 입자인 Weak boson이다.

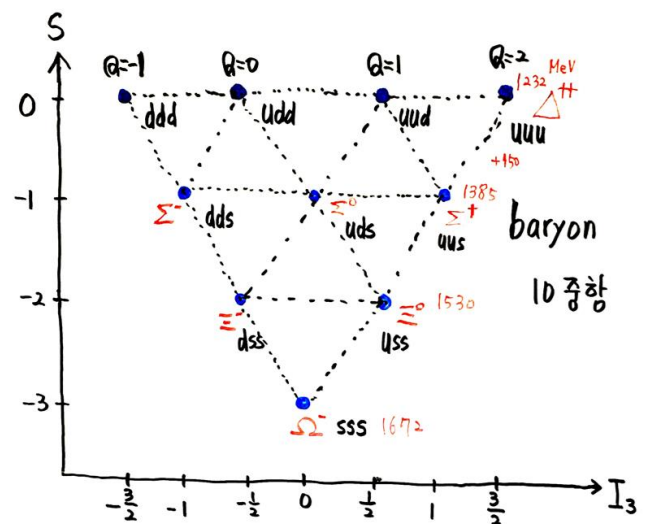
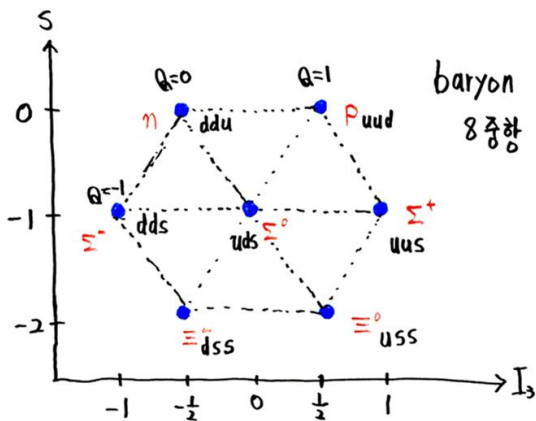
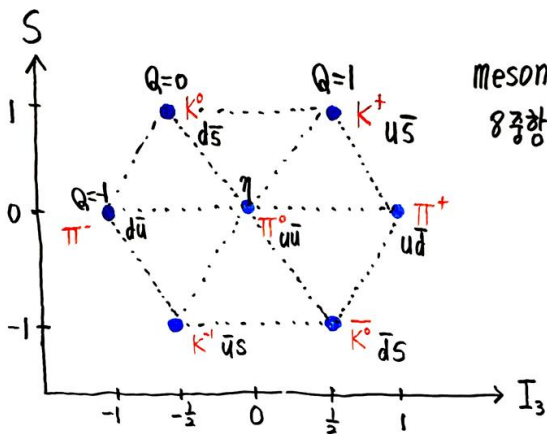
Gauge boson은 W^+, W^-, Z^0 입자와 포톤(γ)을 합해서 부르는 이름이다.

보존은 force carrier이다. 우주의 4가지 힘을 실어 나르는 입자이다.

보존 전체의 spin, mass, charge를 정리한 표이다.

Boson	Spin(\hbar)	Mass ($\frac{GeV}{c^2}$)	charge e^-
G	2	0	0
γ	1	0	0
W^\pm	1	81	± 1
Z^0	1	91	0
g	1	0	0
H	0	125	0

지금부터 머레이 겔만 Murray Gell-Mann 의 커크 모델이다.



$$I = \frac{n-1}{2} \rightarrow n=1$$

$$n=2 \rightarrow I=\frac{1}{2}$$

$$n=3 \rightarrow I=1$$

$$n=4 \rightarrow I=\frac{3}{2}$$

1960년대부터 본격적인 입자 물리학이 시작된다.

1970-80년대에 소립자의 발견이 쏟아 졌다. 입자들의 동물원이라고 할 정도로 헛갈렸다.

그것을 쿼크 모델로 정리했다.up, down, strange quark 3개 입자로 우주의 모든 입자를 만들어 내었다.
인간의 분류 본능의 정수이다.

분류 기준이 strangeness(strange quark의 수)와 Isospin이다.

y축은 strange, x축은 isospin이다.

점 3개(3중항)라는데 의미가 있다. 일중항(singlet), 이중항(doublet), 3중항(triplet) 이것이 하나의 양자수이다.
주기율표의 n, l 값이 양자 수인 것과 같다. 양자역학은 양자 수를 찾아 내는 것이다.

이것을 internal symmetry (내부 대칭)라고 한다. 좌표변환은 외부적 공간 대칭이다. 입자물리학에서는 입자들의 내부 대칭을 찾아 낸다. 동일한 성질을 가진 집합을 찾아내는 일이 입자물리학의 핵심이다.

3중항 자체가 양자 수이고, 변하지 않는 물리적 속성이다. 3중항에 해당되는 입자가 파이온이다.

파이온 3개(π^+, π^0, π^-)로서 3중항을 구성한다. 파이온은 메존이다. q와 \bar{q} 로 구성되어 있다.

파이온이 3중항으로 구성되어 있으므로 isospin은 각각 -1,0,1이 된다.

Isospin은 internal symmetry에서 가장 첫 번째 핵심적인 양자 수 이다.

원자 핵에 중성자를 충돌 시킬 경우 중성자는 전하가 0이므로, 중성자 입장에서는 양성자와 중성자가 구별이 되지 않는다. 중성자 입장에서는 중성자와 양성자를 같은 (Iso)것으로 간주한다.

전자에 스핀 업과 스핀 다운이 있듯이, 중성자와 양성자를 동일한 입자의 다른 상태로 보고 spin으로 표시하자라고 해서 나온 개념이 isospin이다.

Isospin개념이 입자물리학의 시작이다. Isospin은 내부 대칭이다. 입자의 내부적 회전이다.

I_3 는 어떤 한 축에 투영한 값이다. 그래서 쌍으로 나온다.

3중항, 2중항, 1중항 그 자체가 양자 수이다.

수평으로 점을 연결하면 다중항으로 묶이는 같은 입자들이다. 같은 값의 isospin을 갖는다.

비스듬하게 빗금으로 연결하면 같은 전하량을 표시한다. $Q=1, Q=0, Q=-1$ 이 된다.

2중항은 케이온(kaon) 입자이다. $K^+, K^0, \bar{K}^0, K^{-}$ 4개의 입자가 있다. \bar{K}^0 는 K의 반입자(antimatter)이다.

Meson 8중항이다.

Meson은 q와 \bar{q} 로 구성된다. \bar{q} 는 반입자이다. 전하를 반대로 갖는다.

K^+ 는 $u\bar{s}[\frac{2}{3} + (-\frac{1}{3})=1]$, K^0 는 $d\bar{s}$ 로 구성된다. 같은 식으로 모든 입자를 만들 수 있다.

다음은 baryon 8중항이다. Quark 3개로 이루어진 입자들이다.

3중항 입자가 Σ 입자이다. Strangeness가 -1이다. $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$ 입자가 있다.

Strangeness 0인 2중항이 양성자와 중성자이다.

양성자(proton)은 전하량(Q)이 1이므로 $uud(\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{-1}{3} = 1)$ 로 구성된다.

중성자(neutron)는 $Q=0$ 이므로 $ddu(\frac{-1}{3} + \frac{-1}{3} + \frac{2}{3} = 0)$ 로 구성된다.

Strangeness가 -2인 2중항이 크사이(Ξ) 입자이다.

시그마(Σ) 입자와 크사이(Ξ) 입자도 같은 방식으로 구성할 수 있다.

다음은 baryon 10중항이다.

머레이 겔만은 세계적 인물로 만들어준 도표이다.

입자물리학에서 입자 하나 찾는데 몇 년 씩 걸린다. 그런데 baryon 10중항 도표 만들고 나서 몇 달 내에 오메가(Ω)입자를 찾았다. 질량, 스핀까지 예측한 그 지점에서 찾았다. 그리고 이 모델이 맞다는 것을 극적으로 증명하고, 전 세계 입자 물리학자들이 환호성을 올렸던 유명한 도표이다.

4중항을 구성하는 입자는 델타(Δ)입자이다.

Isospin의 정의는 $I=(n-1)/2$ 이다.

2중항일 때는 $n=2$, $I=1/2$,

3중항이면 $n=3$, $I=1$,

4중항이면 $n=4$, $I=3/2$ 이다.

Δ^{++} 입자는 s 가 0이므로 s 가 들어가지 않는다. 전하량이 $Q=2$ 이므로 uuu 로 구성된다.

겔만은 오메가(Ω) 입자를 예측했다. strangeness -3이고 isospin 0이다. s 가 3이므로 sss 로 구성된다.

에너지 량도 예측했다. $s=0$ 인 Δ^{++} 입자 에너지가 1232 MeV 였으므로 한 단계 내려 갈 때 대략 150 MeV가량 높아 졌으므로 오메가 입자의 에너지를 1680 MeV 정도로 예측했었다. 그리고 얼마되지 않아서 오메가 입자(실제 에너지:1672 MeV)를 발견했다. 이로서 쿼크 모델이 맞다는 것을 결정적으로 입증했다. 11월 혁명이라고도 한다. 머레이 겔만Murray Gell-Mann 은 이 도표로 1969년 노벨상을 수상했다.

이 도표에 들어간 쿼크는 업쿼크, 다운 쿼크 그리고 S쿼크 3개 뿐이다.

우주론 전체에서도 2세대, 3세대는 나오지 않는다. 쿼크 모델에서 1세대만 알면된다.

입자	$Y = 2(Q - I_3)$ hyper charge	$I = \frac{n-1}{2}$	I_3	$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$	$D_\mu = \partial_\mu + i g_1 \frac{Y}{2} B_\mu + i g_2 \frac{\tau}{2} W_\mu + i g_3 \frac{\lambda}{2} G_\mu$ $\rightarrow \gamma, W^\pm, Z^0, \rightarrow 3개 쿼크$	\mathcal{L}
$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$u_L = \frac{1}{2}$ $d_L = -\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$D_\mu = \partial_\mu + i \frac{1}{6} g_1 B_\mu + i g_2 \frac{\tau}{2} W_\mu$ $\rightarrow \gamma, W^\pm$	$\mathcal{L} = \bar{q}_L i \gamma^\mu D_\mu q_L$
u_R	$\frac{4}{3}$	0	0	$\frac{2}{3}$	$D_\mu = \partial_\mu + i \frac{2}{3} g_1 B_\mu$	$\mathcal{L} = \bar{u}_R i \gamma^\mu D_\mu u_R$
d_R	$-\frac{2}{3}$	0	0	$-\frac{1}{3}$	$D_\mu = \partial_\mu - i \frac{1}{3} g_1 B_\mu$	$\mathcal{L} = \bar{d}_R i \gamma^\mu D_\mu d_R$
$l_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$	-1	$\frac{1}{2}$	$\nu_L = \frac{1}{2}$ $e_L = -\frac{1}{2}$	0 -1	$D_\mu = \partial_\mu - i \frac{1}{2} g_1 B_\mu + i g_2 \frac{\tau}{2} W_\mu$	$\mathcal{L} = \bar{l}_L i \gamma^\mu D_\mu l_L$
e_R	-2	0	0	-1	$D_\mu = \partial_\mu - i g_1 B_\mu$	$\mathcal{L} = \bar{e}_R i \gamma^\mu D_\mu e_R$
$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$	1	$\frac{1}{2}$	$\phi_1 = \frac{1}{2}$ $\phi_2 = -\frac{1}{2}$	1 0	$D_\mu = \partial_\mu + i \frac{1}{2} g_1 B_\mu$	$\mathcal{L} = (D^\mu \phi)^\dagger D_\mu \phi$

우주는 입자로 구성되어 있다.

우주를 이야기할 때는 양성자 중성자 외에도 페르미온과 보존만 알면 된다.

q_L 에서 L은 left이다.

지금 이야기하는 것은 internal symmetry이다. 내부 공간이다. 눈으로 볼 수 없고 상상만으로 할 수 있는 것이다.

있는지 없는지는 모르지만 이렇게 분류하면 반드시 그런 속성들이 드러난다. 그렇게 우주가 분류가 된다.

입자물리학에서는 오른 쪽과 왼쪽이 확연히 구별이 된다. Chirality 문제이다.

Standard model은 기본적으로 왼쪽 세계이다. 뉴트리노는 왼 쪽 뉴트리노 밖에 없다. 오른 쪽 뉴트리노는 없다.

쿼크 이중항은 업 쿼크와 다운 쿼크를 한 집합으로 처리한다. Left quark만 모은다.

오른 쪽 업 쿼크와 오른 쪽 다운 쿼크는 따로 처리한다. 이 둘은 단중항(singlet)이다.

마찬가지로 왼쪽 렙톤에서 왼쪽 뉴트리노와 왼 쪽 전자는 한 집합으로 처리한다.

그리고 오른 쪽 전자는 따로 처리한다.

이상은 쿼크 모델에 있는 것이다. 스칼라 입자는 우주의 vacuum 상태를 차지하는 입자이다.

우주는 스칼라 입자에 잠겨있다. 스칼라 입자는 이중항을 구성한다. 모든 것의 어머니이다.

스칼라 입자는 ϕ_1 과 ϕ_2 이중항으로 구성되어 있다. 이 ϕ_2 입자가 힉스 입자이다.

우주의 모든 입자 속성은 양자수 y , isospin, isospin의 투영값(I_3), 전하량 Q 로 구분할 수 있다.

$$I = (n-1)/2$$

$Q = I_3 + \frac{y}{2}$, 이시지마-겔만 공식으로 노벨 상을 받았다.

$y = 2(Q - I_3)$, hyper charge라고 한다

단중항은 $n=1$, 이중항은 $n=2$, 삼중항은 $n=3$, 사중항은 $n=4$ 이다.

왼쪽 쿼크, 왼쪽 렙톤, 스칼라 입자는 이중항이고, 나머지는 모두 단중항이다.

그러므로 I 값은 이중항은 $1/2$, 단중항은 0 이다.

I_3 값은 I 값에 $+$ 와 $-$ 값을 넣어 주면 된다. u_L 값을 $1/2$ 로 하고 d_L 값을 $-1/2$ 로 한다. 그렇게 하기로 한 것이다. 업 쿼크와 다운 쿼크는 스핀 값만 차이 난다.

힉스 입자의 전기량은 제로이다. 힉스 입자는 전자기 상호작용을 하지 않는다. 그래서 Photon의 질량이 제로이다. 힉스 바다에서 입자가 인터랙션을 해야 질량을 획득하는데 힉스 입자는 쿨롱 전하가 제로이므로 전자기 상호작용을 하지 않는다. 포톤이 힉스 필드에서 전자기 상호 작용을 하지 않기 때문에 질량이 제로이다.

우주의 모든 입자는 힉스 필드에서 상호작용을 통해 질량을 얻는다. 힉스 장의 전하량이 제로이므로 힉스 장은 전자기 상호 작용을 하지 않는다. 그래서 빛은 질량을 획득하지 못한다. 전자기 상호작용의 양자화한 것이 포톤이다. 전자기 상호작용은 전자를 띤 입자끼리 한다.

전하량에는 여러 종류가 있다. electro magnetic charge, weak charge, strong color charge 등이 있다.

쿨롱전하를 양자화 한 것이 포톤이다. 포톤과 힉스장 모두 전기량이 제로이기 때문에 서로 상호 작용을 하지 않는다. weak charge는 힉스장과 상호 작용을 하여 질량을 얻는다.

이중항으로 묶인 입자들의 Y 값은 동일하다.

이 값들을 계산해야하는 이유는 Y 값에 따라 공변 도함수가 달라지기 때문이다.

공변도함수는

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_1 \frac{y}{2} B_\mu + ig_2 \frac{\tau}{2} W_\mu + ig_3 \frac{\lambda}{2} G_\mu \text{로 표시 된다.}$$

입자물리학을 한다는 것은 이 공식을 계산하는 것이다.

여기까지 가는 것을 GUT라고 한다. 지금 단계에서는 $D_\mu = \partial_\mu + ig_1 \frac{y}{2} B_\mu + ig_2 \frac{\tau}{2} W_\mu$ 까지만 하면 된다.

각 각의 공변 도함수는 위 식에 Y 값을 대입하면 된다.

다만 오른 쪽 R의 경우는 $ig_2 \frac{\tau}{2} W_\mu$ 값이 제로가 되어 없어진다. \mathcal{L} 도 정해진 식에 따라 정리한다.

의미를 이해하려고 하지 말고 새로운 언어를 배운다는 생각으로 익히면 된다.

갈릴레이 변환에서는 외부대칭 이었다면 지금은 입자 속 internal symmetry 에서 내부 좌표계라고 생각하면 된다. 눈에 보이지는 않지만 수학으로, 상징으로 찾아낸 것이다. 그래서 힉스 메커니즘까지 간 것이다.

그것이 확신이 섰기 때문에 수십 조원을 들여 가속기를 만든 것이다.

B'_μ 은 포톤이다.

$$B'_\mu = B_\mu - \frac{1}{g_1} \partial_\mu \chi \quad S = \int \mathcal{L} d^4x$$

$$\mathcal{L}' = \mathcal{L} + i \partial_\mu \theta (i a \bar{\psi} \gamma^\mu \psi)$$

$$-\frac{1}{g_1} \dot{j}^\mu \partial_\mu \chi \stackrel{\chi=\theta}{=} i \partial_\mu \theta (i a \bar{\psi} \gamma^\mu \psi)$$

$$\dot{j}^\mu = a g_1 \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$$

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - a g_1 B_\mu$$

$$\gamma^\mu \Rightarrow \psi_{L,R} \rightarrow \frac{1 \mp \gamma_5}{2}$$

라그랑지안이 좌표변환에서 불변하는 조건을 찾는 식이다.

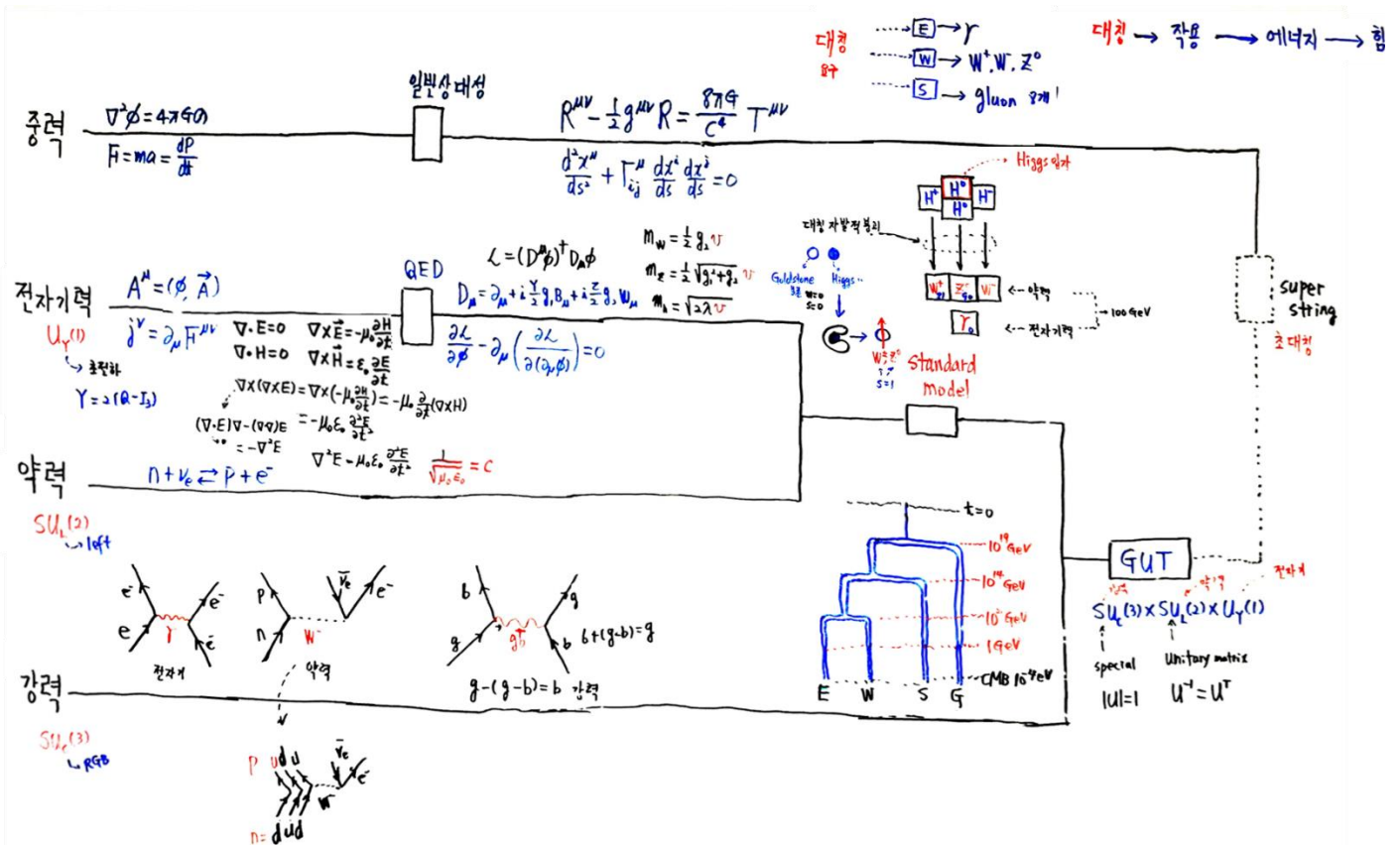
도함수가 공변 도함수로 바뀌어 지면 좌표변환에서 대칭을 만족해 준다.

그래서 공변 도함수를 찾아낸 것이다. 좌표변환에 공변성을 확보하기 위해 도함수를 공변함수로 변환한 것이다.

힉스 메카니즘 전 단계이다

결국은 라그랑지안 밖에 없다. 라그랑지안을 적분한 것이 작용이다.

감마 매트릭스는 왼쪽 오른쪽 속성을 드러나게하는 오퍼레이터이다. 4×4 매트릭스이다.



(수식 설명은 동영상을 참고하시기 바랍니다)

우주에는 4가지 힘이 있다.

중력, 전자기력, 약력, 강력이 있다.

뉴턴에서 시작한 중력은 아인슈타인이 일반 상대성 이론으로 재 정리한다.

전자기력은 양자화하여 QED(quantum electron dynamics)로 정리된다.

약력은 QED와 결합하여 Standard Model이 된다. Standard model을 입자 물리학이라 한다.

standard model과 강력이 통합하여 GUT(grand unified theory)가 된다. durlRkwlms 정상 과학이다.

실험결과도 있고 교과서에도 나온다. 그러나 아직은 중력이 양자화되지는 못했다.

4가지 힘을 합치려는 노력은 계속되고 있으며 그 중 하나가 초끈 이론(super string)이다. 아직까지는 실험 결과는 없다.

페르미온과 보손을 대칭 관계로 두고 입자물리학을 전개한 것을 초 대칭이론이라고 한다.

실험 결과가 없어 검증되지는 않았다. 수식이 워낙 아름다워서 많은 물리학자들이 참여하고 있다.

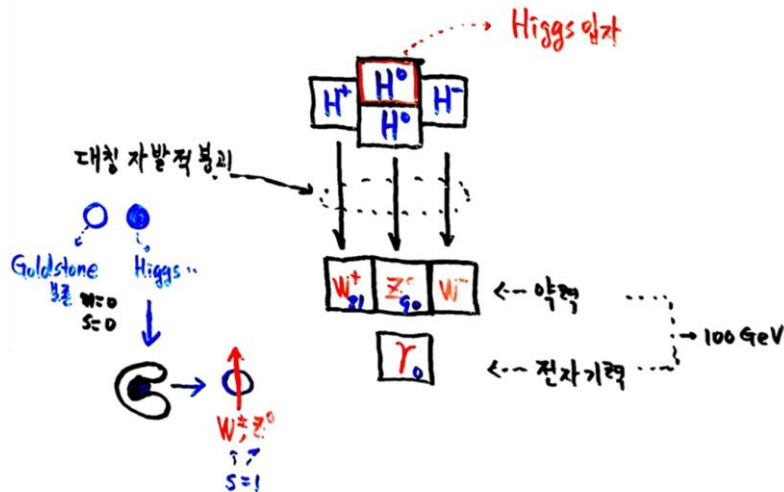
$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c$$

$\mu_0 \epsilon_0$ 진공의 자석적 성질에서 빛의 속도가 나왔다. 진공이 그냥 진공이 아니다.

진공은 엄청난 물리적 속성을 갖고 있다. 진공은 구조가 있다. 진공의 구조를 꺼집어 내는 것이 작용이다.

작용을 적분한 것이 라그랑지안이다.

01:21



4 종류의 힉스 필드가 있다. 장과 입자를 같이 사용할 수 있다. 펼쳐져 있는 장을 양자화하면 하나의 입자가 생긴다. 전자기 장을 양자화한 것이 포톤이다.

양자역학에서는 전자기 장이나 포톤이란 말을 같이 쓸 수 있다. 전자기 장을 매개해 주는 입자가 포톤이다.

H^0 2 종류, H^+ , H^- 모두 4 종류의 힉스 입자가 있다.

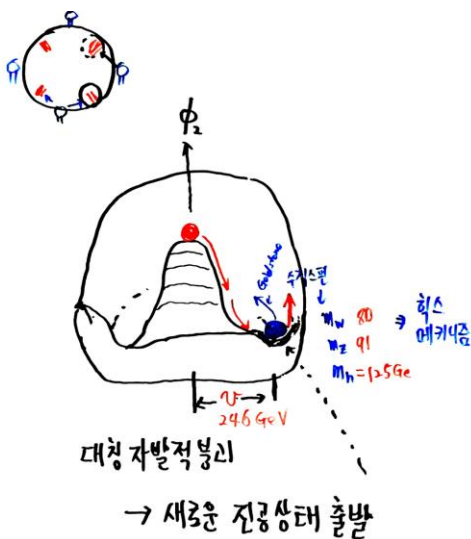
힉스 장이 더 에너지가 낮은 장으로 자발적으로 대칭이 붕괴된다. 대칭의 자발적 붕괴라고 한다.

그래서 힉스 입자가 W^+ , W^- , Z^0 입자로 바뀐다. 그리고, 힉스 장과는 상호 작용하지 않는 또하나의 입자인 포톤(γ)이 출현한다. W^+ , W^- , Z^0 를 약력이라고 하고, 포톤을 전자기력이라고 한다.

약력과 전자기력은 에너지가 100GeV 이상이 되면 통합된다. W^+ , W^- , Z^0 입자는 질량이 각각 81GeV 와 91GeV 이지만 포톤은 질량이 제로이다. 그런데도 이들이 한 형제 었다는 것이다.

힉스 필드 중 하나인 H^0 가 독립되어 나와서 힉스 입자가 된다.

01:26



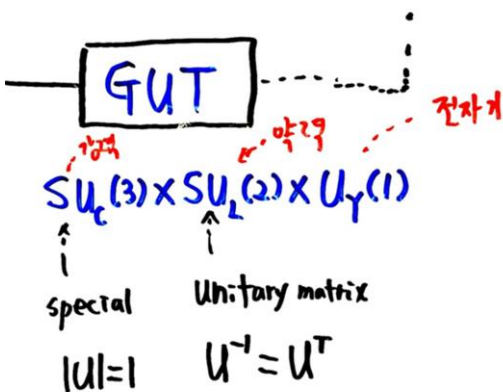
대칭은 그보다 더 낮은 에너지 상태가 있으면 붕괴된다. 대칭의 자발적 붕괴라고 한다.
 에너지 제로 상태로 알고 있었던 붉은 점이 더 낮은 상태로 떨어진다. 떨어진 에너지는 낮은 틈을 타고 돌아간다. 이 돌아가는 상태를 gold stone boson 이라고 한다. Gold stone boson 은 질량과 스핀이 모두 제로이다.

테이블에 스푼과 포크가 좌석 중간에 세팅되어 있을 경우 한 사람이 자신의 오른 쪽 스푼을 취하면 다른 사람들도 자동적으로 오른 쪽 스푼을 잡게 된다. 이것이 자발적 대칭 붕괴에 관한 와인버거의 설명이다.
 한 사람이 선택하면 돌아가면서 다른 사람들도 방향이 결정된다.

떨어지면 2 개의 입자가 나온다. 하나는 gold stone boson 이고 하나는 힉스 boson 이다.
 대칭이 자발적으로 붕괴하면 반드시 골드스톤 보존이 출현한다는 것이 골드스톤의 정의이다.
 골드스톤 보존은 질량과 스핀이 모두 제로이다. 이런 입자는 지금 우리의 우주에는 존재하지 않는다.
 골드스톤 보존은 사라져야 한다. 힉스 입자가 골드스톤 보존을 삼킨다.
 삼키고 나면 힉스 입자가 수직 방향의 스핀이 생긴다. 수직 스핀이 생긴 입자들이 W^+, W^-, Z^0 입자들이다.
 스핀 값이 1 이다. 스핀이 생기면서 질량도 같이 얻게 된다.
 이것이 개략적인 힉스메카니즘이다. 게이지 보존이 질량을 획득하는 과정이다. 심오한 이야기이다.
 갤럭시가 있고, 별이 있고, 태양계가 있고 우리가 있는 이유이다. 우주가 출현한 것이다.

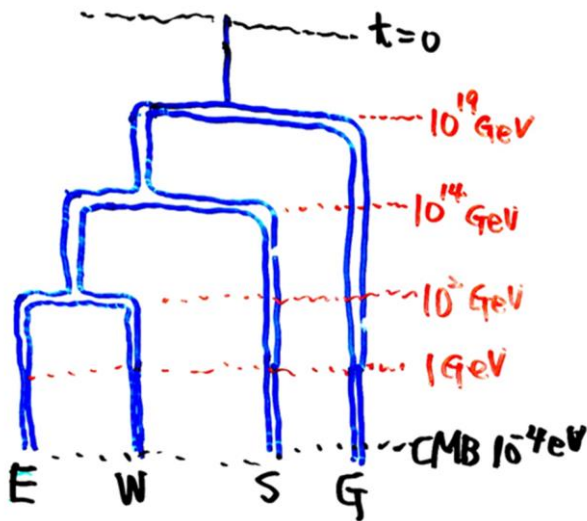
힉스 장이 더 낮은 에너지 장으로 바뀌었다.
 대칭의 자발적 붕괴는 반드시 새로운 진공상태의 출현을 촉발한다. 새로운 진공에너지 값이 ϕ_2 값이다.
 축에서 흠까지 에너지 값(v)이 진공기대 값인데 246 GeV 이다.
 양성자의300배 되는 질량을 갖는다. 진공 자체가 그런 에너지를 갖고 있다. W^+, W^-, Z^0 입자는 81과91 GeV의 질량을 획득하고, 힉스 입자도 125GeV의 질량을 획득한다. 질량을 얻는 방법을 힉스 메카니즘이라고 한다.
 그 질량을 획득하는 과정을 와인버거가 수식으로 풀고, 노벨상을 수상했다.
 그리고 2012년에 힉스 입자를 가속기에서 찾아 내었다. 질량이 정확하게125GeV였다.
 그래서 우리가 입자물리학 관점에서 우주를 거의 모두 알게 되었다.

01:38



전자기 상호 작용은 $U_Y(1)$ 으로 표시하고, 약력은 $SU_L(2)$, 강력은 $SU_C(3)$ 으로 표시한다
 $SU_C(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$ 이것이 GUT이다. 강력에서 S는 special이다. 행렬의 절대값이 1이다.
 Unitary 행렬은 어떤 행렬의 역 행렬과 transition 한 값이 같은 행렬이다.

01:41



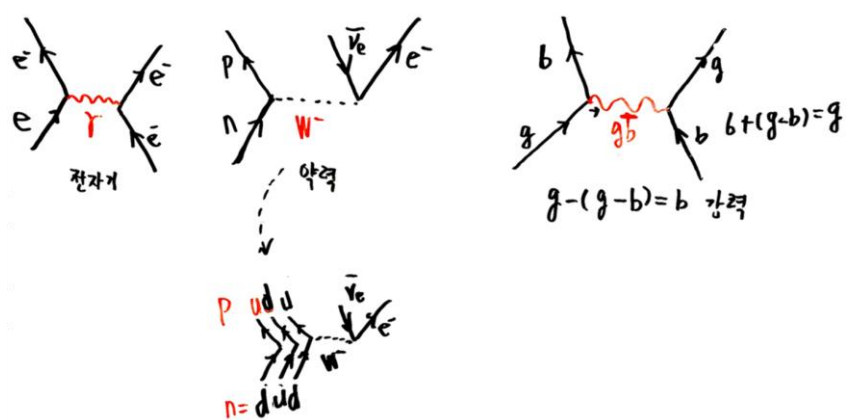
우주의 출현 후 우주의 네 가지 힘이 분화된다.

중력이 먼저 분화되고(에너지 값이 10^{19} GeV), 다음에 강력이 분화된다(10^{14} .GeV)

마지막에 약력 과 전자기력이 분화된다.(10^2 Gev)

양성자가 출현하는 시점의 에너지가 1GeV 이고, 지금 우주의 에너지(CMB)는 10^{-4} eV 이고 온도는 -270°C 이다

01:44



전자기 상호작용은 포톤이 매개한다

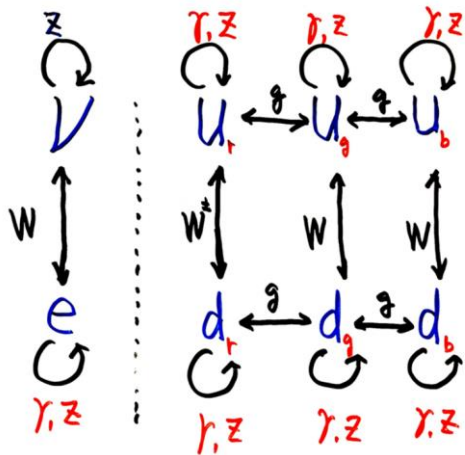
중성자(n)가 양성자(p)로 바뀔 때는 w^- 입자가 매개하고, 전자(e^-)가 나오고 반 뉴트리노($\bar{\nu}_e$)가 들어간다.

약한 상호 작용(베타 붕괴)의 과정을 세밀히 보면 결국 down quark 이 up quark 로 바뀌는 과정이다.

모든 변환이 quark 상태에서 일어난다.

강한 상호 작용에서는 green quark이 blue quark로 바뀌거나 blue quark이 green quark로 바뀔 때는 $g\bar{b}$ 글루온 을 주고 받는다. $g-(g-b)=b$, $b+(g-b)=g$ 가 된다. Color charge를 주고 받는다.

01:51



quark이 변환하는 방식이다.

수평으로 동일한 up quark 이나 down quark 사이의 color charge를 바꾸는 것이 gluon이다.

수직으로 up quark과 down quark을 바꾸는 것이 W^+, W^- 입자이다. 핵 변환을 일으킨다.

포톤과 Z^0 입자는 자체 변환을 일으킨다. 그러나 뉴트리노는 전자기 상호 작용을 하지 않고, 오른 쪽 뉴트리노가 없다. 한쪽 입자가 없으면 이중항을 만들지도 못한다. 그래서 공변 미분이 짧다. 어쨌든 뉴트리노는 포톤과는 상호 작용을 하지 않는다.

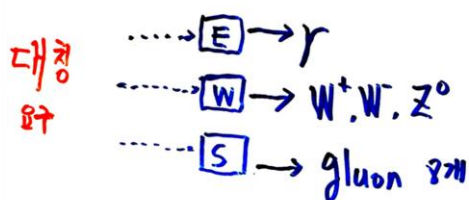
현재 자연 과학에서 중력이 아직 통합되지 않았다. 통합 시키기 위해 초끈 이론이 나왔다.

초끈 이론을 초 중력 또는 초 대칭 이론이라고도 한다. 대칭이기 때문에 많은 물리학자들이 몰린다. 대칭이면 틀릴 수가 없다. 물리학자들이 확신을 갖고 있다. 지금 물리학의 주류는 초끈 이론이다. 그동안 페르미온과 보손 사이의 대칭은 만들지 못했다. 둘 사이의 대칭을 초 대칭이라 한다. 초 대칭으로 가는 이론이 초끈이론이고, 많은 과학자들이 끌리는 이유는 아름답기 때문이다. 아름답기 때문에 살아 있는 이론이다. 초 대칭은 완벽하게 아름답다. 이것이 실험으로 증명된다면 우주의 4가지 힘은 완벽하게 통합된다. 그 입구까지 온 것이 GUT이다.

이렇게 통합하는데 기본 포맷이 작용이다. 라그랑지안을 적분하면 작용이 된다.

패턴을 보면 모두 작용을 구하는 것이다.

02:00



대칭 \rightarrow 작용 \rightarrow 에너지 \rightarrow 힘

대칭의 요구에 의해 전자기 상호작용, 약한 상호 작용, 강한 상호 작용이 출현 했다.

각 각의 힘을 실현하는 입자가 포톤, W^+, W^-, Z^0 그리고 Gluon이다. 글루온은 8개 이다.

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_1 \frac{y}{2} B_\mu + ig_2 \frac{\tau}{2} W_\mu + ig_3 \frac{\lambda}{2} G_\mu$$

중력을 제외한 우주의 3가지 힘을 이 한 공식에 모두 포함하였다.

이 공변 도함수로 궁극적으로 라그랑지안을 구한다.

그 라그랑지안을 구하면 바로 힉스 입자의 질량이 나온다. 눈물이 나올 정도로 아름답다

대칭이 작용의 구조를 결정해 준다.

작용을 미분하면 에너지가 되고, 에너지를 미분하면 힘이된다.

초끈 이론에 과학자들이 몰리는 이유는 대칭을 끝까지 밀어 붙이기 때문이다.

아직 정상과학으로 놓지 못하는 이유는 실험 결과들이 없기 때문이다. 그러나 이론은 너무 아름답다.

입자 물리학의 다른 이름이 게이지 이론이다.

함수로서 다른 함수에 곱하거나 나누어도 물리 상태가 바뀌지 않는 것이 함수가 e^{ix} 이다.

정수 1에 해당하는 함수이다. $|e^{ix}|=1$ 이다.

양-밀즈 이론에서 글로벌 대칭은 문제가 없으나 로컬 대칭은 깨어 졌다. 그 대칭을 회복하기 위해서는 힘이 필요하다. 그 힘이 우주의 3가지 힘이다. Local gauge symmetry가 force로 바뀐다. 그것이 대칭의 요구조건이다.

글로벌 대칭은 대부분 만족하고 문제가 없었다. 그래서 로컬 게이지 대칭을 만족하는 수식을 유도하기 시작했다.

그 수식을 구하는 중간 과정이 공변도함수로 모이는 것을 알게 되었다. 그래서 공변 도함수를 구했다.

공변 도함수들이 라그랑지안에 들어가 있고, 라그랑지안은 작용이다. 우주는 대칭이 요구하여 작용의 구조가 결정된다. 지난 시간에 작용의 구조에 의해 척도 불변성과 운동량과 모멘텀의 대칭 조건을 배웠다. 그것이 우주의 설계도이다. 그 모든 것의 시작이 대칭이다.

원자가 실체가 아니고 궁극적으로 대칭이 실체라는 주장이 나온다. 충격적인 이야기이다. 원자나 분자는 대칭의 요구 조건에 의해 출현한 것으로 본다. 궁극적인 실체는 대칭 밖에 없다는 것이다. 과장된 것이 아니다.

대칭이 깨어졌다고 알고 있으나 사실은 숨겨져 있다. 숨겨진 대칭이다.

입자 물리학의 끝까지 들어가면 도대체 우리가 믿는 실체가 무엇인지 다시 생각하게 된다.

수고하셨습니다.