

对味相关相加型量子数的思考

#94

马欣华

中国科学院高能物理研究所

maxh@ihep.ac.cn

摘要

传统的味相关相加型量子数是在粒子物理发展历史中随着粒子的逐次发现被动提出的，是临时性的、片面性的概念，在夸克-轻子（费米子）全部被发现后，已经不能够全面、简单地反应粒子的味性质，这些都需要加以整理和更新。我提出了费米子量子数F和单位电弱荷F₀，使得味相关相加型量子数由9个减少为2个，和传统的味相关相加型量子数相比有众多优势。

1. 传统的味相关相加型量子数

“总是守恒”的相加型量子数：
在强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用中守恒。

fermion	Q	B	L _e	L _μ	L _τ	L
d	-1/3	1/3	0	0	0	0
u	2/3	1/3	0	0	0	0
s	-1/3	1/3	0	0	0	0
c	2/3	1/3	0	0	0	0
b	-1/3	1/3	0	0	0	0
t	2/3	1/3	0	0	0	0
e	-1	0	1	0	0	1
ν _e	0	0	1	0	0	1
μ	-1	0	0	1	0	1
ν _μ	0	0	0	1	0	1
τ	-1	0	0	0	1	1
ν _τ	0	0	0	0	1	1

反夸克的相加型量子数，数值大小和夸克一样，但符号与夸克相反。

传统的味相关相加型量子数-“强相互作用的”

fermion	I	I ₃	S	C	B*	T	Y
d	1/2	-1/2	0	0	0	0	1/3
u	1/2	1/2	0	0	0	0	1/3
s	0	0	-1	0	0	0	-2/3
c	0	0	0	1	0	0	4/3
b	0	0	0	0	-1	0	-2/3
t	0	0	0	0	0	1	4/3

反夸克的相加型量子数，数值大小和夸克一样，但符号与夸克相反，特别地，反夸克与夸克的I一样

在强相互作用和电磁相互作用中守恒，但在弱相互作用中不守恒，特别地，I在弱相互作用和电磁相互作用中都不守恒

传统的味相关相加型量子数-“电弱作用的”

fermion	Q	I _{w3}	Y _w	fermion	Q	I _{w3}	Y _w
d _L	-1/3	-1/2	1/3	d _R	-1/3	0	-2/3
u _L	2/3	1/2	1/3	u _R	2/3	0	4/3
s _L	-1/3	-1/2	1/3	s _R	-1/3	0	-2/3
c _L	2/3	1/2	1/3	c _R	2/3	0	4/3
b _L	-1/3	-1/2	1/3	b _R	-1/3	0	-2/3
t _L	2/3	1/2	1/3	t _R	2/3	0	4/3
e _L	-1	-1/2	-1	e _R	-1	0	-2
ν _{eL}	0	1/2	-1	ν _{eR}	0	0	0
μ _L	-1	-1/2	-1	μ _R	-1	0	-2
ν _{μL}	0	1/2	-1	ν _{μR}	0	0	0
τ _L	-1	-1/2	-1	τ _R	-1	0	-2
ν _{τL}	0	1/2	-1	ν _{τR}	0	0	0

反夸克的相加型量子数，数值大小和夸克一样，但符号与夸克相反。

类盖尔曼-西岛公式

$$Q/e = I_{w3} + Y_w/2$$

弱超荷Y_w与Y完全不同，却与B&L相同

盖尔曼-西岛公式

$$Q/e = I_3 + Y/2$$

超荷 Y = B + S + C + B* + T

为什么不同夸克的味量子数（包括同位旋及其投影I₃，以及S, C, B*, T, 共6个）不同而且繁琐？
它们没有在QCD中使用，他们真的是“强相互作用”的吗？

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \sum_{f=u,d,s,c,b,t} \bar{q}_f (i\gamma^\mu D_\mu - m_f) q_f - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a$$

为什么它们在弱相互作用下不守恒？传统的“强相互作用”味相关相加型量子数与“电弱作用”味相关相加型量子数有什么关系？
为什么超荷Y是一个重子数和部分味量子数的混合量，在盖尔曼-西岛公式却与I₃并列？

2. 新的味相关相加型量子数

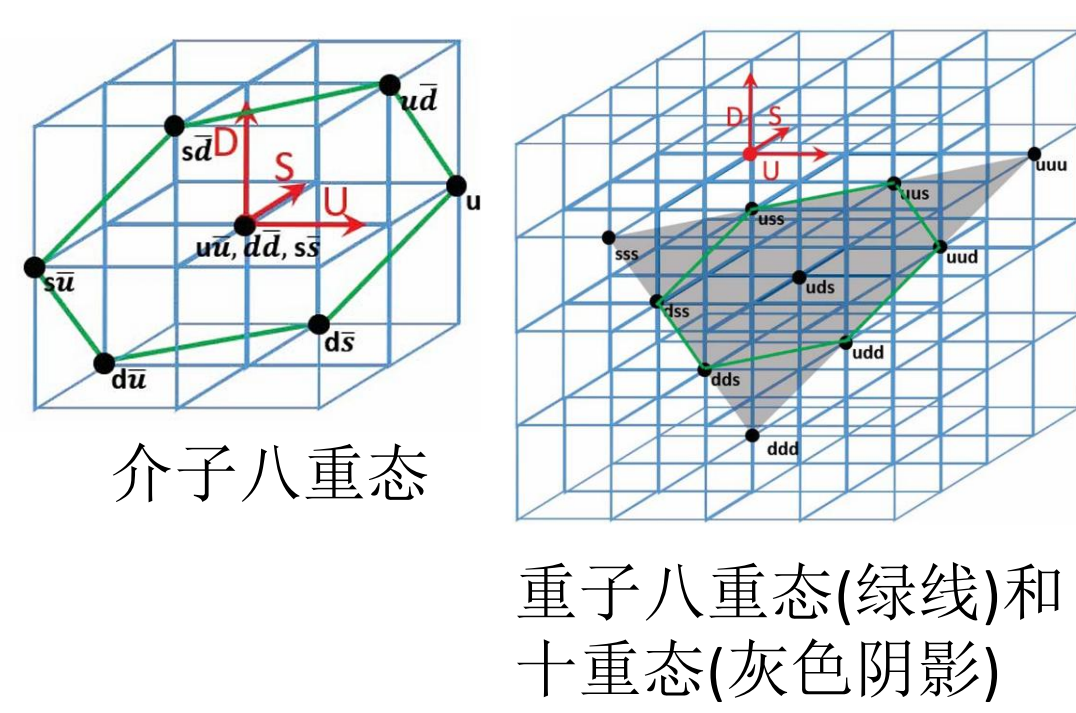
新“u & d”相加型量子数:

$$D = I_3 + (-1)^n I = \begin{cases} -1 & : n=1, \text{d quark} \\ 0 & : n=1, \text{u quark} \\ +1 & : n=0, \text{d anti-quark} \\ 0 & : n=0, \text{u anti-quark} \end{cases}$$

$$U = I_3 - (-1)^n I = \begin{cases} 0 & : n=1, \text{d quark} \\ +1 & : n=1, \text{u quark} \\ 0 & : n=0, \text{d anti-quark} \\ -1 & : n=0, \text{u anti-quark} \end{cases}$$

$$I_3 = (D+U)/2$$

$$I = (-1)^n (D-U)/2$$



新“夸克”味相关相加型量子数:

$$Q/e = (B+H)/2$$

$$H = D + U + S + C + B^* + T$$

$$H = \begin{cases} -1 & : \text{quark is 'd' type} \\ +1 & : \text{quark is 'u' type} \end{cases}$$

$$H = 0 \text{ if lepton}$$

H在只包含夸克的弱相互作用下守恒，如 $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
H_L在只包含轻子的弱相互作用下守恒，如 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

U, D, H和H_L只是过渡概念，在F提出后就完成了使命。

F在所有的弱相互作用下守恒，如 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

与Q一样，F和F₀在弱、电磁、强相互作用下都守恒

传统的

fermion	Q	Y	I ₃	S	C	B*	T	Y
d	-1/3	1/3	-1/2	0	0	0	0	1/3
u	2/3	1/3	1/2	0	0	0	0	1/3
s	-1/3	0	0	-1	0	0	0	-2/3
c	2/3	0	0	0	1	0	0	4/3
b	-1/3	0	0	0	0	-1	0	-2/3
t	2/3	0	0	0	0	0	1	4/3
e	-1	0	0	0	0	0	0	0
ν _e	0	0	0	0	0	0	0	0
μ	-1	0	0	0	0	0	0	0
ν _μ	0	0	0	0	0	0	0	0
τ	-1	0	0	0	0	0	0	0
ν _τ	0	0	0	0	0	0	0	0

新的

fermion	Q	F	F ₀
d	-1/3	-1	1/3
u	2/3	1	1/3
s	-1/3	-1	1/3
c	2/3	1	1/3
b	-1/3	-1	1/3
t	2/3	1	1/3
e	-1	-1	-1
ν _e	0	1	-1
μ	-1	-1	-1
ν _μ	0	1	-1
τ	-1	-1	-1
ν _τ	0	1	-1

反夸克的相加型量子数，数值大小和夸克一样，但符号与夸克相反。

3. 弱相互作用选择定则与F守恒

u, d, s quarks

type of weak interaction	conserved additive quantum number	selection rule in weak interaction	examples
pure leptonic	F, H _L	null	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
pure hadronic	F, H	1) $\Delta S = \mp 1, \Delta I = \pm 1/2, \Delta I_3 = \pm 1/2$ 2) $\Delta S = \mp 2, \Delta I_3 = \pm 1$	$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$
fermionic	F	1) $\Delta S = \Delta Q_b = \pm 1, \Delta I = \pm 1/2, \Delta I_3 = \pm 1/2$ 2) $\Delta S = 0, \Delta I = \pm 1, \Delta I_3 = \pm 1$	$\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

heavier quarks F $\Delta S = -1, \Delta C = -1, \Delta I_3 = 0$ $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 + e^+ + \nu_e$

弱相互作用选择定则之前只是经验的，现在能用F守恒推导出来

温馨提示：考试的时候用F守恒来判断反应是否成立，比用选择定则既快又准

相反的情况：
满足盖尔曼-西岛公式，但是没有探测到

$$\Delta S = -\Delta Q_b$$

如: $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$

$$suu \rightarrow ddu + e^+ + \bar{\nu}_e$$

$$F: -1+1+1 \rightarrow -1-1+1+1-1$$

$\Delta S = -\Delta Q_b = 1$ and $\Delta I_3 = -3/2$, but

$$\Delta F = -2$$

没有探测到的选择能够用F不守恒来解释。

4. F和F₀在电弱理论中的应用

传统的“电弱作用”味相关相加型量子数:

fermion	Q	I _{w3}	Y _w
d _L	-1/3	-1/2	1/3
u _L	2/3	1/2	1/3
s _L	-1/3	-1/2	1/3
c _L	2/3	1/2	1/3
b _L	-1/3	-1/2	1/3
t _L	2/3	1/2	1/3
e _L	-1	-1/2	-1
ν _{eL}	0	1/2	-1
μ _L	-1	-1/2	-1
ν _{μL}	0	1/2	-1
τ _L	-1	-1/2	-1
ν _{τL}	0	1/2	-1
d _R	-1/3	0	-2/3
u _R	2/3	0	4/3
s _R	-1/3	0	-2/3
c _R	2/3	0	4/3
b _R	-1/3	0	-2/3
t _R	2/3	0	4/3
e _R	-1	0	-2
ν _{eR}	0	0	0
μ _R	-1	0	-2
ν _{μR}	0	0	0
τ _R	-1	0	-2
ν _{τR}	0	0	0

新的味相关相加型量子数:

fermion	Q	F	F ₀
d _L	-1/3	-1	1/3
u _L	2/3	1	1/3
s _L	-1/3	-1	1/3
c _L	2/3	1	1/3
b _L	-1/3	-1	1/3
t _L	2/3	1	1/3
e _L	-1	-1	-1
ν _{eL}	0	1	-1
μ _L	-1	-1	-1
ν _{μL}	0	1	-1
τ _L	-1	-1	-1
ν _{τL}	0	1	-1
d _R	-1/3	0	-2/3
u _R	2/3	0	4/3
s _R	-1/3	0	-2/3
c _R	2/3	0	4/3
b _R	-1/3	0	-2/3
t _R	2/3	0	4/3
e _R	-1	0	-2
ν _{eR}	0	0	0
μ _R	-1	0	-2
ν _{μR}	0	0	0
τ _R	-1	0	-2
ν _{τR}	0	0	0

I_{w3}、Y_w与F/2、F₀等价

电弱相互作用的拉格朗日量,费米子-规范玻色子作用部分

传统表达

$$-\mathcal{L}_{Wff} = i\bar{\Psi}\gamma^\mu D_\mu \Psi$$

协变导数

$$D_\mu = \partial_\mu + ig_W \mathbf{W}_\mu \cdot \mathbf{t} + i\frac{g_B}{2} Y_w B_\mu$$

t=τ/2是弱同位旋算子, τ是泡利2×2矩阵。

在混合SU(2)群和U(1)群后

$$-\mathcal{L}_{Wff} = \mathcal{L}_W + \mathcal{L}_Z + \mathcal{L}_{em}$$

电磁场 $\mathcal{L}_{em} = e\bar{\Psi}\gamma^\mu Q\Psi A_\mu$

带电流弱场 $\mathcal{L}_W = \frac{g_W}{\sqrt{2}} \bar{\Psi}_L \gamma^\mu (W_\mu^+ \tau_+ + W_\mu^- \tau_-) \Psi_L$

中性流弱场 $\mathcal{L}_Z = g_Z \bar{\Psi} \gamma^\mu (I_{w3} - Q s_W^2) \Psi Z_\mu$

新表达

$$D_\mu = \partial_\mu + i\frac{g_W}{2} \mathbf{W}_\mu \cdot \boldsymbol{\tau} + i\frac{g_B}{2} F_0 B_\mu$$

弱同位旋算子就是τ

$$\mathcal{L}_Z = g_Z \bar{\Psi} \gamma^\mu Q_Z \Psi Z_\mu$$

$$Q_Z = \frac{c_W^2}{2} F - \frac{s_W^2}{2} F_0$$

电磁场和中性流弱场合并成中性流场

$$\mathcal{L}_Z = g_Z \bar{\Psi} \gamma^\mu Q_Z \Psi Z_\mu$$

$$\mathcal{L}_{em} = e\bar{\Psi} \gamma^\mu Q\Psi A_\mu$$

$$\mathcal{L}_{eZ} = \mathcal{L}_{em} + \mathcal{L}_Z = \bar{\Psi} \gamma^\mu Q_{eZ} \Psi X_{\mu\nu}$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} A_\mu \\ Z_\mu \end{pmatrix}$$

$$-\mathcal{L}_{Wff} = \mathcal{L}_W + \mathcal{L}_Z + \mathcal{L}_{em}$$

$$-\mathcal{L}_{Wff} = \mathcal{L}_W + \mathcal{L}_{eZ}$$

$$\mathbf{Q}_{eZ} = \frac{1}{2} e \mathbf{C} \mathbf{F}_{eZ} = \begin{pmatrix} eQ \\ g_Z Q_Z \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{eZ} = \begin{pmatrix} F \\ F_0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ a_w & -t_w \end{pmatrix}$$

5. 总结

- 费米子量子数F在弱、电磁、强相互作用下都守恒，而传统的味相关相加型量子数在弱相互作用下不守恒；
- 单位电弱荷F₀是重子数和轻子数的组合，具有荷的属性，取代了超荷Y，排除了味量子数的混合；
- 公式Q/e = (F₀ + F)/2 适用于所有费米子，比盖尔曼-西岛公式更具普遍性；
- 弱相互作用选择定则之前只是经验的，现在能用F守恒推导出来，而且没有探测到的选择能够用F不守恒来解释；
- F/2和F₀跟电弱理论中的弱同位旋(I_{w3})和弱超荷(Y_w)等价；
- 在电弱相互作用和强相互作用中味相关相加型量子数由9个减少为2个，即F和F₀；
- 用F和F₀对拉格朗日函数做了新的表述。