第 15 卷 第 6 期　高 能 物 理 与 核 物 理　Vol. 15, No. 6
1991 年 6 月　HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS　June, 1991

能量大于 10GeV 的宇宙线中超硬正电子的起源

陈凤至　聂传辉
(安徽师范大学物理系,安徽芜湖 241000)

王　平
(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

摘　要

本文构造了一个 $SU(3)_L\times U(1)$ 模型，并把模型中的重轻子(N 粒子) 与黑暗物质粒子等同起来. 通过引入适当的相互作用，N 粒子可以发生微弱的衰变,从而解释了能量大于 10GeV 的宇宙线中超硬正电子的起源.

最近，有人报告在能量大于 10GeV 的宇宙线中存在超硬的正电子成分[1]，对于这一现象,有各种解释. 文献[2]指出,如果有能量大于 20GeV 的单色正电子注入银晕，迴旋加速器效应或逆康普顿效应会使之失去单色性,最后得到与观测一致的正电子谱分布.不过,为使正电子失去单色性,在银晕中的贮存时间要高达 10^8 年. 文献[3]认为，极其微弱地衰变的有质量粒子,如组成星系黑暗物质的粒子,也能提供上述正电子. 至于这种有质量粒子为何物,文献[3]假定是一种特定的 $SU(2)_L\times SU(2)_R\times U(1)$ 模型中的右手 Majorana 中微子.

由于从未观测到过 Majorana 粒子,本文考虑用 Dirac 粒子代替 Majorana 粒子.因此,相应的模型也被修改为 $SU(3)_L\times U(1)$ 模型. 另一方面,从粒子物理、天体物理和宇宙学的综合考虑得出，黑暗物质的候选者应当是不参予强相互作用和电磁相互作用的粒子[4]. 因此，我们把弱衰变粒子选为中性重轻子(在下文中简称为N 粒子).

本文的安排如下. 首先我们构造一个 $SU(3)_L\times U(1)$ 模型. 接着引入新的相互作用. 通过这种相互作用,N 粒子会衰变为正负电子和中微子(或者正电子加 $\bar{u}d$ 等). 由于这种衰变是由辐射修正引起的,所以有效耦合常数极其微小. 相应地,N 粒子的寿命也非常之长 ($\sim10^{25}$s). 最后,我们作一些数值估计并给出几点说明.

一

在本节中,我们构造一个 $SU(3)_L\times U(1)$ 模型. 首先选取如下的左手和右手费米子

本文 1990 年 10 月 15 日收到.

多重态.

i）轻子三重态

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ e\\ N\end{pmatrix}_L,\quad \begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu\\ M\end{pmatrix}_L,\quad \begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau\\ T\end{pmatrix}_L;$$

角标 L 表示左手粒子．为叙述和书写方便，以下有时把这三个三重态简记作 L_i，这里 i 指示代数．

ii）轻子单态

$$e_R,\ N_R,\ \mu_R,\ M_R,\ \tau_R,\ T_R$$

角标 R 表示右手粒子．以上粒子简记作 e_{Ri} 和 N_{Ri}，i 指示代数，如 $e_{R1}=e_R$，$e_{R2}=\mu_R$，$e_{R3}=\tau_R$ 等等．

iii）夸克三重态

$$\begin{pmatrix}u\\ d\\ P_1\end{pmatrix}_L,\quad \begin{pmatrix}c\\ s\\ P_2\end{pmatrix}_L,\quad \begin{pmatrix}t\\ b\\ P_3\end{pmatrix}_L;$$

以上诸态简记作 Q_{L_i}，i 指示代数．

iv）夸克单态

以上诸态简记作 u_{R_i}，d_{R_i} 和 P_{R_i}．i 的意义同前．

接着，我们把电荷公式选为

$$Q=\frac{1}{2}\lambda_3-\frac{\sqrt{3}}{6}\lambda_8+Y.$$

式中 λ_3 和 λ_8 是两个对角的 Gell-mann 矩阵；Y 是"弱超荷"，即 $U(1)$ 群的生成元．对于轻子三重态，$Y=-\frac{1}{3}$；对于夸克三重态，$Y=\frac{1}{3}$；对于轻子和夸克单态，Y 即相应粒子的电荷．至于本模型中各种费米子的电荷，可参看表 1．

表 1　费米子的电荷

费米子	$\nu_e\ \nu_\mu\ \nu_\tau$	$e\ \ \mu\ \ \tau$	N　M　T	u　c　t	d　s　b	$P_1\ \ P_2\ \ P_3$
电荷	0	−1	0	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$

为了赋予费米子(除中微子)和规范场以质量，我们引入三个 Higgs 三重态：

$$\phi=\begin{pmatrix}\phi_1\\ \phi_2\\ \phi_3\end{pmatrix},\quad \eta=\begin{pmatrix}\eta_1\\ \eta_2\\ \eta_3\end{pmatrix},\quad \xi=\begin{pmatrix}\xi_1\\ \xi_2\\ \xi_3\end{pmatrix}.$$

这里ϕ和η的Y值均为$-\frac{1}{3}$,而ξ的Y值为$\frac{2}{3}$. 选择适当的 Higgs 势，可使ϕ,ξ和η具有如下的真空期望值:

$$\langle\phi\rangle = w\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix},\quad \langle\eta\rangle = v_1\begin{pmatrix}1\\0\\0\end{pmatrix},\quad \langle\xi\rangle = v_2\begin{pmatrix}0\\1\\0\end{pmatrix}.$$

Higgs 粒子和费米子的相互作用拉氏量为

$$\begin{aligned}\mathscr{L}_Y = {} & f_1^{ij}\overline{\mathrm{L}}_i\phi \mathrm{N}_{\mathrm{R}j} + f_2^{ij}\overline{Q}_i\phi \mathrm{P}_{\mathrm{R}j} + f_3^{ij}\overline{\mathrm{L}}_i\xi \mathrm{e}_{\mathrm{R}j} \\ & + f_4^{ij}\overline{Q}_i\xi \mathrm{d}_{\mathrm{R}j} + f_5^{ij}\overline{Q}_i\eta \mathrm{u}_{\mathrm{R}j} + \mathrm{h.c.}\end{aligned} \tag{1}$$

通过真空的自发破缺，这个拉氏量可赋予除中微子外的所有费米子以质量. 另外，从 Higgs 粒子的动能项，我们可以求出规范场的质量. 假定与群$SU(3)_{\mathrm{L}}$对应的规范场为$A_\mu^i(i=1,2,\cdots,8)$,与群$U(1)$对应的规范场为B_μ. 定义

$$W_\mu^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_\mu^1 \mp iA_\mu^2),\quad U_\mu^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_\mu^4 - iA_\mu^5),$$

$$\overline{U}_\mu^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_\mu^4 + iA_\mu^5),\quad V_\mu^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(A_\mu^6 \mp iA_\mu^7).$$

我们得与这些场对应的粒子的质量为

$$m_{\mathrm{W}}^2 = \frac{1}{2}g^2(v_1^2+v_2^2),\quad m_{\mathrm{U}}^2 = \frac{1}{2}g^2(w^2+v_1^2),\quad m_{\mathrm{V}}^2 = \frac{1}{2}g^2(w^2+v_2^2).$$

其次,定义

$$C_\mu = r^{-1}\left[g\left(A_\mu^3 + \frac{1}{\sqrt{3}}A_\mu^8\right) - \frac{2}{3}g'B_\mu\right],$$

$$D_\mu = r^{-1}\left(-g\frac{2}{\sqrt{3}}A_\mu^8 - \frac{2}{3}g'B_\mu\right),$$

$$r = \frac{2}{3}\sqrt{3g^2+g'^2},$$

可得场C_μ与D_μ的质量矩阵

$$\begin{bmatrix}\frac{1}{2}r^2(v_1^2+v_2^2) & \frac{1}{2}r^2v_2^2 \\ \frac{1}{2}r^2v_2^2 & \frac{1}{2}r^2(w^2+v_2^2)\end{bmatrix},$$

将此质量矩阵对角化,可得两个中性中间玻色子Z_1和Z_2的质量. 剩下一个无质量的中间玻色子即光子. 至此,我们完成了我们的$SU(3)_{\mathrm{L}}\times U(1)$模型的建造.

二

从公式(1)可得粒子N和P的质量

$$m_{\mathrm{N}} = f_1 w,\qquad m_{\mathrm{P}} = f_2 w. \tag{2}$$

为简单起见,这里忽略了代的混合，因此f_1和f_2只与一个代有关. 从公式(2)可以看出,

假定 f_2 大于 f_1，则P粒子的质量大于N粒子的质量，因而N粒子不会衰变为P粒子加其他粒子，亦即N粒子是稳定的. 另一方面，我们希望把N粒子看成是宇宙线中超硬正电子的提供者，这就需要N粒子会发生微弱的衰变. 为此，我们在本模型中引入如下的相互作用：

$$\mathscr{L} = f_{ij}(\mathrm{u}_{\mathrm{R}_i}^T C \mathrm{d}_{\mathrm{R}_j}\omega_1 + \mathrm{P}_{\mathrm{R}_i}^T C \mathrm{d}_{\mathrm{R}_j}\omega_2) + \mathrm{h.c.}$$

式中 C 是电荷共轭矩阵；ω_1 和 ω_2 是标量粒子，是 $SU(3)$ 单态和色三重态. 此外，我们还引入一标量势项

$$\mu^2(\omega_1^*\omega_2 + \mathrm{h.c})$$

有了这两项，我们可以画出如下的费曼图(图 1). 仿照文献[5]的方法，我们可以估计出该费曼图的振幅，

$$m_{\mathrm{W-V}}^2 = \frac{g^2 f^2}{(16\pi^2)^2}\left(\frac{\mu^2}{M_\omega^2}\right)\cdot\left(\frac{m_t M_{\mathrm{P}}}{M_\omega^2}\right) m_{\mathrm{b}}^2,$$

式中 M_ω 是 ω_1 或 ω_2 的质量，M_{P} 是 P_3 粒子的质量，m_t 和 m_b 分别是 t 夸克和 b 夸克的质量. 这个振幅将场 W_μ 和 V_μ 混合起来，从而使 W_μ 和 V_μ 的质量矩阵变为

$$\begin{bmatrix} m_{\mathrm{W}}^2 & \frac{1}{2} m_{\mathrm{W-V}}^2 \\ \frac{1}{2} m_{\mathrm{W-V}}^2 & m_{\mathrm{V}}^2. \end{bmatrix}$$

为使这个质量矩阵对角化，我们须作一正交变换

$$\begin{bmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta \\ -\sin\zeta & \cos\zeta \end{bmatrix},$$

式中 ζ 称为混合角. 不难证明，混合角的值为

$$\zeta = \frac{g^2 f^2}{(16\pi^2)^2}\left(\frac{\mu^2}{M_\omega^2}\right)\left(\frac{M_{\mathrm{P}} m_t}{M_\omega^2}\right)\frac{m_{\mathrm{b}}^2}{m_{\mathrm{V}}^2}, \tag{3}$$

式中 m_{V} 是中间玻色子 $\mathrm{V}_\mu^\pm$ 的质量. 注意，并以 M_{P_1}，m_u 和 m_d 代替 M_{P_3}，m_t 和 m_b，我们得到另一个混合角，但这个混合角比公式(3)的混合角小很多，因此在N粒子的衰变中不起什么作用.

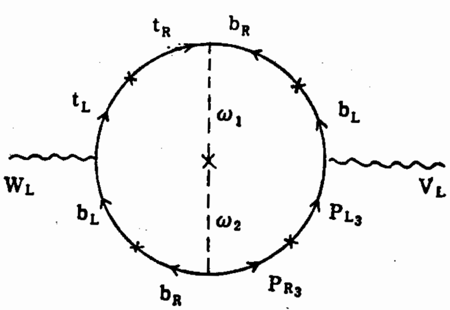

图 1　导致 $\mathrm{W_L}$-$\mathrm{V_L}$ 混合的二圈图

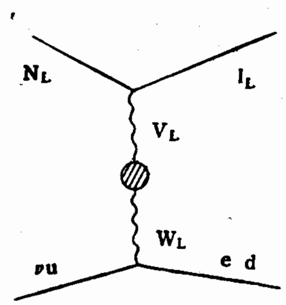

图 2　N粒子衰变的费曼图，图中带阴影的圈表示图 1 的费曼图

这样，由于 $\mathrm{W_L}$ 和 $\mathrm{V_L}$ 的混合，N粒子可以通过如下过程(图 2)衰变为中微子和正负

电子(或正电子加 $\bar{u}d$ 等). 在下一节中,我们将通过数值估计说明N粒子的衰变可以用来解释能量大于 10GeV 的宇宙线中超硬正电子的起源.

三

在作数值估计之前,让我们看一下天体物理观测数据对N粒子提出哪些要求. 首先,对银盘中的低能宇宙线的测量表明,"^{10}Be 的寿命"约为(1—2)×10^7年. 再根据次级射线与初级射线比率的测量,可推知从银盘中逃逸出来的时间要比上述数值约小一个数量级,即逃逸时间约为 10^6 年. 这一事实一方面说明文献[2]的前提条件在银盘中不能成立,另一方面说明文献[3]所提出的质量 $\simeq$ 30GeV 的粒子的三体衰变是可采纳的. 因此,我们假定本模型中的N粒子为黑暗物质的组分,且质量为 30GeV.

有了逃逸时间,再根据正电子在银盘中的密度 $n_e \simeq 10^{-13}/\mathrm{cm}^3$,可以估计出黑暗物质的寿命 τ_D 为

$$\tau_D \geqslant \left(\frac{m_P}{m_D}\right) \times 10^{26}\mathrm{s},$$

式中 m_P 是质子质量,m_D 是黑暗物质粒子的质量. 按我们的假定 $m_D \simeq 30\mathrm{GeV}$. 代入 m_D 和 m_P 的数值,得N粒子的寿命为 $\tau \sim 10^{25}$ 秒.

现在来看我们的模型. 由图 2 不难求出, $N \rightarrow e^+e^-\nu$ (或 $e^+\bar{u}d$ 等)的有效耦合常数为 ζG_F, G_F 为费米常数. 再由量纲考虑,得N粒子的寿命公式为

$$\tau^{-1} = \zeta^2 G_F^2 m_N^5.$$

假定 $M_P \sim 10\mathrm{TeV}$, $M_\omega \sim 50\mathrm{TeV}$, $\mu \sim 5\mathrm{TeV}$, $m_V \sim 100\mathrm{TeV}$ $m_b \sim 5\mathrm{GeV}$, $m_t \sim 150$ GeV,我们得N粒子的寿命为

$$\tau \sim 10^{25}\mathrm{s}.$$

可见与本节开头指出的天体物理要求相符.

最后,我们作几点说明. 第一,我们的理论存在三角形反常,因而是不可重整的. 但是,只要引入很重的镜象夸克和轻子,反常即可消除,而且以上所得结果不受影响. 第二,N粒子也可通过 Higgs 粒子(ξ_1 和 ξ_3)发生衰变,但因相应的有效耦合常数比 ζG_F 小很多,故可以忽略不计. 第三,由于N粒子的寿命很长,必须证明N粒子的剩余丰度不至影响观测结果 $\Omega = 1$. 利用有关公式进行计算表明,适当地修正我们所用的参数数值(如 f 和 μ^2 的数值)或适当地选取 Higgs 粒子的质量,可以使条件 $\Omega = 1$ 得到满足.

总之,本文构造了一个 $SU(3)_L \times U(1)$ 模型. 我们把模型中的重轻子,即N粒子解释为黑暗物质的组分. 通过引入新的相互作用,N粒子可以发生微弱的衰变,从而解释了能量大于 10GeV 的宇宙线中超硬正电子的起源.

参考文献

[1] D. Meuller and J. Tang. in: Proc. 19th Intern. Cosmic Ray Conf. (Lajolla, 1985)
[2] A. Tylka and D. Eichler. University of Maryland preprint (1987).
[3] K. Babu,D.Eichler and R. N. Mohapatra., *Phys. Lett.*, **B226**(1989), 347.
[4] J. Primack, D. Seckel and B. Sadoulet., *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **38**(1988), 751.
[5] D. Chang and R. N. Mohapatra, *Phys. Rev. Lett.*, 58(1987), 1600.

The Source of Anomalous Positrons in the Cosmic Rays Above 10 GeV

CHEN FENGZHI　NIE CHUANHUI
(*Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu* 241000)

WANG PING
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing* 100039)

ABSTRACT

We suggest that the heavy neutral lepton in a specific version of $SU(3)_L \times U(1)$ model can not only act as dark matter but also provide with a source of anomalous positrons in the cosmic rays above 10 GeV.