

## 非粒子

清華大學物理系

中央研究院物理所

伊利諾大學（美國芝加哥分校）物理系

張敬民

阮自強

姜偉宜

在日內瓦和法國交界的 CERN 實驗室,大強子加速器快開跑。這是一個夢未已求的實驗,是一個模稜在宇宙起源的一剎那間,可以說是開始的億份之一秒,從而捕捉在當中演變的物理,包括有可能發生的量子引力、大統一場論、超對稱及其破壞、色動力學演變、弱電對稱的破壞及相變等。我們熟識的標準模型眾所周知,只是一個在低能量才有效的有效理論。從能階問題上,一般都認為在 TeV 尺度時,新物理將會出現,但是什麼無人知曉,可能是超對稱、多維空間、Z' 等,也可能是我們從未想過的。近年內出現了非粒子的建議。

粒子物理世界中可能存在一個尺度不變的新區,存在很高的能量尺度中,一般情況下無法測到。但它的存在可能對現有或將來高能實驗有著很有趣的影響。最初哈佛大學 Georgi 教授[1]認為一個尺度不變而含一個不簡單的紅外線定點的新區(稱為非粒子),可能在高能量時可以來描述粒子世界。一個初步模型如 Banks-Zaks [2]的理論,其理論會透過次元的變質,在較低的能量尺度  $\Lambda_U$  下,流向一個紅外線定點。在  $\Lambda_U$  以下,非粒子物理演譯成一些添寫的場,其有不同的尺度空間及羅倫斯結構。

非粒子作動項有一個特別性質,就是因為它尺度不變,它有連貫性的光譜密度

$$\rho(P^2) = A_{d_U} \theta(P^0) \theta(P^2) (P^2)^{d_U-2}$$

當中  $d_U$  是非粒子的尺度空間,  $A_{d_U}$  是一個正常化的常數。Georgi 選擇  $A_{d_U}$  成爲跟一批  $d_U$  個無質量粒子的空間相位大小相同,

$$dLIPS_{d_U} = A_{d_U} [(p_1 + p_2 + \dots + p_{d_U})^2]^{d_U-2}$$

於是

$$A_{d_U} = \frac{16\pi^{5/2}}{(2\pi)^{2d_U}} \frac{\Gamma(d_U + \frac{1}{2})}{\Gamma(d_U - 1)\Gamma(2d_U)}$$

當  $d_U$  是一個正整數時,  $A_{d_U}$  跟我們所認知的一樣。在此不同的地方,就是  $d_U$  可以不一定是個正整數,所以一個  $d_U$  維度的非粒子,等同一批  $d_U$  個的無質量的粒子一樣,在高能實驗中有非常不同的特點。其特質引發了很多各方面的研究。

接著,我們[3]和 Georgi[4] 分別利用不同的方法,同時導出非粒子的費曼傳播者:

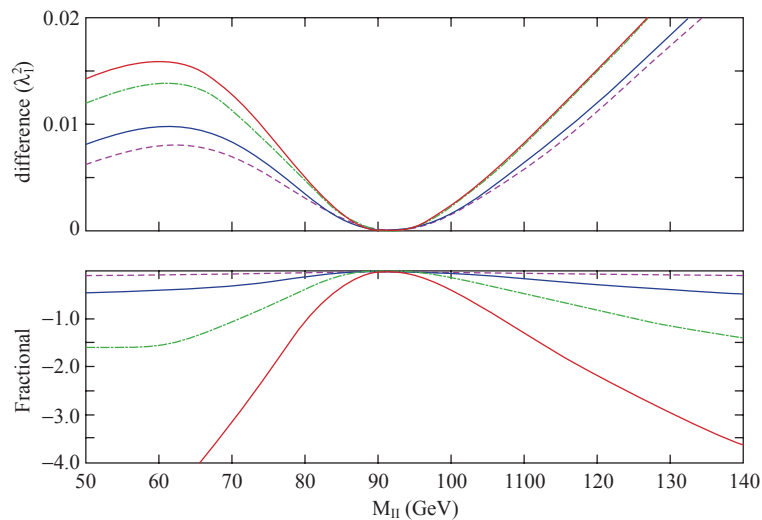
$$\Delta_F(P) = \frac{A_{d_U}}{2 \sin(d_U \pi)} \frac{1}{(-P^2 - i0^+)^{2-d_U}}$$

當中出現了一個 CP-保留的相位  $\exp(-id_U \pi)$ , 它存在時間性的傳播者 ( $P^2 > 0$ )。

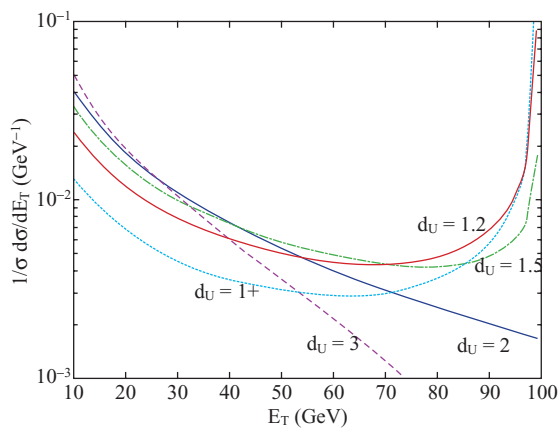
這是最令人驚訝的一個相位  $\exp(-id_U \pi)$ , 是一般粒子無法產生的。這個相位會跟標準模型的費曼圖產生很有趣的干擾。在文章[3]中,我們是首位(和 Georgi [4]同時)提出非粒子跟標準模型的干擾。特別位於 Z 波色子重量附近,我們考慮了  $e^+ e^- \rightarrow f \bar{f}$ , Z 波色子的費曼圖與非粒子的費曼圖存著不同的相位。其費曼圖所給的共振幅是:

$$M_{\alpha\beta} = \lambda_i^2 Z_{d_U} \frac{1}{\Lambda_U^2} \left( -\frac{s}{\Lambda_U^2} \right)^{d_U-2} + \frac{e^2 Q_i Q_f}{s} + \frac{e^2 g_\alpha^i g_\beta^f}{\sin^2 \theta_w \cos^2 \theta_w} \frac{1}{s - M_Z^2 + iM_Z \Gamma_Z}$$

第一項是非粒子的貢獻,而第二、三項分別是光子和 Z 粒子的貢獻。在圖一中,可看到非常獨特的干擾,在不同  $d_U$  的之下,在 Z 波色子的前和後,干擾圖案都大大不同,在實驗中可以利用精準測量來分別。這個相位也可參予 CP 破壞,在 B 介子衰變中,有一定的影響。



圖一 非粒子在 Z 波色子附近的干擾圖案。「來自 PRL 99, 051803 (2007)」



圖二  $e^+e^- \rightarrow \gamma U$  中光子的能譜，隨著  $d_U$  變化

在[3]中，我們也討論了直接產生非粒子，之前提及過一個  $d_U$  維的非粒子，等同一批  $d_U$  個的無質量的粒子，在實驗中產生不見能量，它的能譜跟一般微中子、暗能量來得很不同，因為  $d_U$  是個任意有理數。我們考慮了  $e^+e^- \rightarrow \gamma U$ ，非粒子最終成為不見能量，而光子可被測量。利用運動學，非粒子的  $P_U^2$  可以寫成

$$P_U^2 = s - 2\sqrt{s}E_\gamma$$

所以透過量光子的能譜，可以分別出非粒子的特性。在圖二，我們表示出光子的量譜，不同  $d_U$  有不同的能譜。

在文章[5]中，我們詳盡了很多費曼圖的守則，及有很多不同的計算，可以給于其他研究者參考及引用。

#### 參考文獻

- [1] H. Georgi, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 221601 (2007).
- [2] T. Banks and A. Zaks, *Nucl. Phys.*, **B196**, 189 (1982).
- [3] K. Cheung, W.-Y. Keung and T.-C. Yuan, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 051803 (2007).
- [4] H. Georgi, *Phys. Lett.*, **B650**, 275 (2007).
- [5] K. Cheung, W.-Y. Keung and T.-C. Yuan, *Phys. Rev.*, **D73**, 075015 (2007).