

## 2. The AKS model

Trong mô hình trong Tham khảo [6], mà chúng tôi gọi ở đây là mô hình AKS, mục đích là không chỉ giải thích khối lượng neutrino nhỏ bé và DM mà còn cả sự bất đối xứng baryon của Vũ trụ ở thang TeV. Ngoài các neutrino tay phải  $N_R^\alpha$  ( $\alpha = 1, 2$ ) ở thang TeV, khu vực Higgs bao gồm hai doublet Higgs chẵn  $Z_2$   $\Phi_i$  ( $i = 1, 2$ ) và các singlet tích điện lẻ  $Z_2$   $S^\pm$  và một singlet thực trung hòa lẻ  $Z_2$   $\eta^0$ . Do đó, các trạng thái vật lý trong khu vực chẵn  $Z_2$  là  $H$  (CP-chẵn),  $A$  (CP-lẻ),  $H^\pm$  và  $h$  (CP-chẵn).

Ma trận khối lượng neutrino được tạo ra ở mức ba vòng thông qua sơ đồ trong Hình 1 (bên phải) và được biểu thị là

$$M_{ij}^\nu = \sum_{\alpha=1}^2 \left( \frac{1}{16\pi^2} \right)^3 \frac{(y_{\ell_i} h_i^\alpha)(y_{\ell_j} h_j^\alpha)(\kappa \tan \beta)^2 v^2}{M_{N_R^\alpha}} I_2(m_{H^\pm}, m_{S^\pm}, m_{N_R^\alpha}, m_\eta), \quad (6)$$

trong đó  $m_{H^\pm}, m_{S^\pm}, m_{N_R^\alpha}$  và  $m_\eta$  lần lượt là khối lượng của boson Higgs tích điện có nguồn gốc từ doublet  $H^\pm, S^\pm, N_R^\alpha$  và  $\eta^0$ ;  $h_i^\alpha$  và  $\kappa\nu$  lần lượt là các hằng số ghép của  $N_R^\alpha e^i S^+$  và  $H^+ S^- \eta^0$ ;  $\tan \beta = \langle \Phi_2^0 \rangle / \langle \Phi_1^0 \rangle$ , và

$$I_2(x, y, z, w) = \frac{-4z^2}{z^2 - w^2} \int_0^\infty u du \left\{ \frac{B_1(-u; x, y) - B_1(-u; 0, y)}{x^2} \right\}^2 \left( \frac{z^2}{u + z^2} - \frac{w^2}{u + w^2} \right), \quad (7)$$

trong đó  $B_1$  là hàm hệ số tensor trong công thức Passarino-Veltman [25]. Mặc dù khu vực Higgs khá phức tạp để có thể thực hiện kịch bản baryogenesis điện yếu, nhưng cấu trúc hương chỉ được xác định bởi sự kết hợp của  $h_i^\alpha$  và  $m_{N_R^\alpha}$  giống như trong mô hình Ma. Ma trận khối lượng có hệ số vòng lặp bậc ba  $1/(16\pi^2)^3$  với hệ số triệt tiêu bổ sung bởi  $y_i$ . Chúng đủ để tái tạo thang khối lượng neutrino. Do đó, các hằng số ghép liên kết electron  $h_e^{1,2}$  và ghép vô hướng  $\kappa$  có bậc  $\mathcal{O}(1)$  cho  $m_{N_R}^{1,2} \sim \mathcal{O}(1)$  TeV. Các hằng số ghép Yukawa  $h_i^\alpha$  có tính phân cấp là  $h_e^{1,2} (\simeq \mathcal{O}(1)) \gg h_\mu^{1,2} \gg h_\tau^{1,2}$ .

Các bộ tham số thỏa mãn dữ liệu hiện tại từ dao động neutrino, LFV, độ phong phú di tích của DM và điều kiện cho chuyển pha điện yếu bậc nhất mạnh được nghiên cứu trong Ref. [6, 14]. Để tái tạo dữ liệu neutrino, khối lượng của  $H^\pm$  phải là 100 - 200 GeV. Đây là một dự đoán quan trọng của mô hình. Để tránh ràng buộc từ  $b \rightarrow s\gamma$ , tương tác Yukawa cho các trường doublet có dạng cái gọi là Loại- X [20],<sup>4</sup> trong đó chỉ một trong các doublet liên kết với lepton và phần còn lại liên kết với quark.

<sup>4</sup> Type-X is referred to as Type-IV in Ref. [26] and Type-I' in Ref. [27].