

Modelo 3-3-1 con neutrinos derechos, implementado en SARAH y SPheno

A. Tapia^a, and R. Benavides^b

^aUniversidad de Medellín, Carrera 87 N° 30 - 65, Medellín, Colombia.

^bInstituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 N° 76 A-354, Vía el Volador, Medellín Colombia.

Received 6 August 2020; accepted 4 September 2020

En este trabajo se presenta por primera vez la implementación del modelo 3-3-1 con neutrinos derechos sin cargas eléctricas exóticas en el paquete SARAH del programa MATHEMATICA y se muestra cómo reproduce de manera correcta los resultados analíticos del modelo. Como prueba de ello, se presentan las matrices de masa para los sectores de quarks donde se ha usado un sector de Higgs con tres tripletes escalares. Luego, usando el programa SPheno, se realiza un análisis numérico de las salidas analíticas obtenidas con SARAH con el objetivo de determinar si el modelo con tres tripletes genera los valores de masas de todos los quarks adecuadamente al compararlos con los aceptados en la literatura. Esta implementación se presenta de manera didáctica y accesible a estudiantes interesados en este campo de la física.

Descriptores: Modelo 3-3-1; SARAH; SPheno.

In this work, for the first time, the implementation of the 3-3-1 model with right-handed neutrinos without exotic electric charges in the SARAH package of MATHEMATICA is presented, and it shows how it correctly reproduces the analytical results of the model. As proof of this, we present the mass matrices for the quark sectors, where a Higgs sector with three scalar triplets has been used. Then, using the SPheno program, a numerical analysis of the analytical outputs obtained with SARAH is performed; this with the objective of determining if the model with three triplets generates the mass values of all quarks adequately when comparing them with those accepted in the literature. This implementation is presented in a didactic and accessible way to students who are interested in this field of physics.

Keywords: 3-3-1 model; SARAH; SPheno.

PACS: 98.80 Cq; 03.70 +k; 12.20 -m; 29.50 +v

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFisE.18.107>

1. Introducción

Se conoce que el Modelo Estándar (ME) de la física de partículas no puede ser una teoría definitiva, por lo tanto se buscan modelos que expliquen algunos de los tópicos que el ME no puede explicar, siempre que dichos modelos estén de acuerdo con el ME. Por esta razón lo más simple es ampliar el ME, lo cual se logra aumentando el sector fermiónico, aumentando el sector escalar a más de una representación del Higgs, o ampliando el grupo Gauge local. En este orden de ideas, se presenta el modelo teórico basado en el grupo Gauge local $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$ (3 – 3 – 1 para acortar) [1–6].

Los resultados experimentales en el CERN-LEP realizado en los años 90 concluyen la existencia de al menos tres familias fermiónicas. Los modelos 3 – 3 – 1 explican de manera natural la razón por el cual número de familias debe ser tres al tratar el álgebra de corrientes y cancelar las anomalías que se presentan en este sector. Lo anterior se logra gracias a que, en estos modelos, las primeras dos familias tienen números cuánticos distintos a la tercera familia.

Las principales características de los modelos 3 – 3 – 1 son:

- En algunos de estos modelos, las anomalías Gauge se cancelan solamente si el número de familias es múltiplo de 3 [5, 7–9] (para garantizar la libertad asintótica de $SU(3)_c$).

- La simetría de Peccei-Quinn puede implementarse fácilmente [10, 11].
- Una familia de quarks tiene números cuánticos distintos, hecho que puede explicar el valor tan grande de la masa del quark top [4, 12].
- El sector escalar posee buenos candidatos a materia oscura [13–15].
- El sector leptónico es capaz de describir algunas propiedades de los neutrinos [16–18].
- La jerarquía en las constantes de acoples de Yukawa puede evitarse al implementar el mecanismo “see-saw” universal [4, 19–22].

Lo anterior genera un gran atractivo para el estudio de estos modelos. Se asume que el grupo gauge electrodébil $SU(3)_L \otimes U(1)_X \supset SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ y que los quarks de quiralidad izquierda son tripletes de color, y los leptones de quiralidad izquierda son singletes de color, los cuales transforman bajo las dos representaciones fundamentales (3 y 3*).

Uno de los sectores básicos de los modelos de la física de partículas es el relacionado con el sector del Higgs responsable de que los campos adquieran masa. En el marco de los modelos 3-3-1 este también debe aumentarse, por ello, se analizará el modelo con tres tripletes escalares presentado en [23].

Por otro lado, se encuentran las herramientas computacionales para obtener de manera más rápida resultados que de

otra manera tomaría mucho tiempo resolver o que resultaría imposible hallar. Así pues, dicho desarrollo ha contribuido a grandes avances en la ciencia. En este sentido, usaremos el paquete de uso libre SARAH [24, 25], el cual se ejecuta a través del programa MATHEMATICA (producto protegido por Wolfram Research) [26], para analizar uno de los modelos 3-3-1 sin cargas eléctricas exóticas (hemos escogido el modelo conocido como 3-3-1 con neutrinos derechos, descrito más adelante). Adicionalmente, se analizará el modelo usando la salida de SARAH como módulo del programa SPheno [24, 25, 27, 28], con el objetivo de realizar cálculos numéricos a nivel árbol para los quarks del modelo y mostrar si es posible tener un modelo realista o no, con tres tripletes escalares.

El artículo está organizado como sigue. En la Sec. 2 se presenta el modelo 3-3-1 con neutrinos derechos a implementar con tres tripletes escalares. En la Sec. 3 se presenta la implementación del modelo 3-3-1 en SARAH. En la Sec. 4 se muestran las salidas analíticas que se obtienen con SARAH y se comparan con algunos resultados reportados en la literatura científica. En la Sec. 5 se presentan los resultados numéricos generados con SPheno para la salida dada por SARAH y en la Sec. 6 se presentan las conclusiones. Un Apéndice al final muestra los archivos creados para lograr una implementación completa en SARAH del modelo 3-3-1 con tres tripletes de Higgs.

2. Modelo 3-3-1 con neutrinos derechos

Los modelos 3-3-1 han sido ampliamente estudiados dentro de la literatura científica. Se trata de modelos libres de anomalías de Gauge, renormalizables, con sector fermiónico, bosónico y escalar aumentado con respecto al Modelo Estándar. Para mayor información, el lector se puede dirigir a [1–6]. En este caso analizaremos uno de los modelos 3-3-1 sin cargas eléctricas exóticas según la clasificación presentada en [23], conocido como modelo 3-3-1 con neutrinos derechos, con tres tripletes escalares. Los campos del modelo son:

2.1. Sector fermiónico

El sector de quarks del modelo es: $Q_L^i = (u^i, d^i, D^i)_L \sim (3, 3, 0)$, $i = 1, 2$, para las primeras dos familias, donde D_L^i se refieren a dos quarks extras de carga eléctrica $-1/3$, mientras que, los números cuánticos entre paréntesis se refieren a las simetrías $[SU(3)_c, SU(3)_L, U(1)_X]$, $Q_L^3 = (d^3, u^3, U^3)_L \sim (3, 3^*, 1/3)$, donde U_L es un quark tipo up extra. Los quarks derechos son $u_L^{ac} \sim (3^*, 1, -2/3)$, $d_L^{ac} \sim (3^*, 1, 1/3)$ con $a = 1, 2, 3$ índice de familia, $D_L^{ic} \sim (3^*, 1, 1/3)$, $i = 1, 2$ y $U_L^c \sim (3^*, 1, -2/3)$.

El sector leptónico es: $L_L^l = (l^-, \nu_l^0, \nu_l^{0c})_L \sim (1, 3^*, -1/3)$, para $l = e, \mu, \tau$, para el índice de familia leptónico y los tres singletes $l_L^+ \sim (1, 1, 1)$ donde ν_l^0 es el campo asociado al neutrino y ν_l^{0c} desempeña el rol de neutrino derecho.

2.2. Sector escalar

En el marco de los modelos $3 - 3 - 1$ sin cargas eléctricas exóticas. El sector escalar que usaremos consta de tres tripletes escalares como se presenta en la Ref. [23]:

$$\Phi_1(1, 3, 1/3) = \begin{pmatrix} \phi_1^+ \\ \phi_1^0 \\ \phi_1'^0 \end{pmatrix}, \text{ con VEV: } \langle \Phi_1 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{pmatrix}, \quad (1a)$$

$$\Phi_2(1, 3, 1/3) = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ \phi_2^0 \\ \phi_2'^0 \end{pmatrix}, \text{ con VEV: } \langle \Phi_2 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1b)$$

$$\Phi_3(1, 3, -2/3) = \begin{pmatrix} \phi_3^0 \\ \phi_3^- \\ \phi_3'^- \end{pmatrix}, \text{ con VEV: } \langle \Phi_3 \rangle = \begin{pmatrix} v_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1c)$$

con la jerarquía $v_1 \sim v_2 \sim 10^2 \text{ GeV} \ll V \sim \text{TeV}$. El rompimiento de la simetría de $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$ se lleva a cabo en dos etapas: el primer rompimiento es hacia el ME y el segundo hacia el electromagnetismo.

Deseamos mostrar que bajo el esquema del rompimiento de simetría de tres tripletes escalares, SARAH y SPheno funcionan, respectivamente, para el análisis analítico y para el análisis numérico de los archivos generados por SARAH. Lo anterior reduce de manera considerable el tiempo de cálculo.

Respecto al sector bosónico Gauge, es el mismo para todos los modelos 3-3-1 sin cargas eléctricas exóticas que bajo este esquema de tres tripletes escalares han sido bastante bien analizados en la literatura. Lo anterior se puede consultar en las referencias [6, 9].

3. Implementación del modelo en SARAH

Como ya se mencionó, SARAH es un paquete de uso libre que funciona bajo el programa MATHEMATICA, el cual permite implementar y analizar analíticamente modelos de física de partículas [24, 25]. SARAH no requiere ninguna compilación; después de descargar el paquete, se descomprime en el directorio de aplicaciones de MATHEMATICA. Para implementar un nuevo modelo, el primer paso consiste en crear un nuevo directorio en $\$PATH/SARAH-X.Y.Z/Models$ con el nombre del nuevo modelo. Dentro de este directorio se deben generar cuatro archivos. El primero es el archivo principal, que lleva el nombre del nuevo modelo. Para nuestro caso será `331-v3.m`. En este se definen los multipletes del modelo, el lagrangiano del mismo, las simetrías de Gauge y la manera como se romperán. Luego se genera el archivo `parameters.m`, que provee información adicional acerca de los parámetros del modelo. También se debe generar el archivo `particles.m`, aquí se definen las partículas del modelo, con algunos detalles no presentes en `331-v3.m`. Finalmente, se debe crear el archivo `SPheno.m`; este se requiere únicamente si se desea crear un módulo de SPheno para realizar cálculos numéricos con el modelo. Estos cuatro archivos se presentan a detalle en el Apéndice A. Para

mayor información sobre la implementación de un modelo en SARAH, consultar las Refs. [24,25].

El modelo a trabajar posee la estructura Gauge $SU(3)_c \otimes SU(3)_L \otimes U(1)_X$, la cual se define dentro del archivo principal 331-v3.m de SARAH en la forma:

```
Gauge[[1]]={B, U[1], xcharge, g1, False};
Gauge[[2]]={WB, SU[3], left, g2, True};
Gauge[[3]]={G, SU[3], color, g3, False};
```

El primer elemento hace referencia al nombre del bosón de Gauge; el siguiente es el grupo Gauge, el nombre del grupo, el nombre de la constante de acoplamiento, y True o False. Esto es relevante si la simetría se rompe como en el caso de de $SU(3)_L$ y existe un índice que corre para los generadores del grupo.

El siguiente paso es introducir uno a uno los campos fermiónicos y los campos escalares de la siguiente manera:

```
FermionFields[[1]] = {Q1, 1, {d1L, d1L, u1L}, 0, 3, 3};
ScalarFields[[1]] = {phi1, 1, {phi1p, phi10, phi1m}, 1/3, 3, 1};
```

donde la primera entrada corresponde al nombre del campo, la segunda es el número de generaciones y el tercero es el nombre de las componentes de $SU(3)_L$. La demás entradas son las cargas bajo el Gauge 3-3-1.

También se debe definir el lagrangiano completo del modelo y la mezcla entre los bosones de Gauge, tanto entre los neutros como para los cargados:

```
DEFINITION[EWSB][GaugeSector] =
{
  {{VB, VWB[7], VWB[8]}, {VP, VZ, VZp}, ZZ},
  {{VWB[2], VWB[5], VWB[6], VWB[3]}, {VWp, conj[VWp], VXp, conj[VXp]}, ZW}
};
```

En la primera línea se definen los bosones de Gauge neutros, $\{B, W_7, W_8\} \rightarrow \{\gamma, Z, Z'\}$, donde ZZ es la matriz de mezcla, mientras que en la siguiente línea se definen los bosones de Gauge cargados, $\{W_2, W_5, W_6, W_3\} \rightarrow \{W^+, W^-, W'^+, W'^-\}$, donde ZW es la matriz de mezcla para este caso.

Lo siguiente es definir los Higgs que adquieren valor de expectación en el vacío, así como también los componentes

cp-par y cp-impar del sector escalar. Después se definen los estados de masa para los fermiones, tanto las matrices de masa como las masas de Majorana o masas de Dirac; esto se logra definiendo los estados espinoriales de los mismos, ya que SARAH considera a todos los fermiones como estados de Weyl de dos componentes. Por esta razón es importante clarificar en SARAH cómo se deben combinar a través de cuatro estados de Weyl para generar un estado de Dirac, si fuese el caso. La implementación completa de todo lo anterior se muestra en la primera sección del Apéndice A.

El siguiente archivo que se debe generar en SARAH es el `parameters.m`. En este archivo se debe introducir información extra del modelo, para definir el nombre de las matrices de mezcla, los ángulos de mezcla, y cada una de las constantes de acoplamiento, con sus respectivos nombres de salida hacia otros programas como, \LaTeX , SPheno y hasta MicrOmegas, en caso de querer analizar materia oscura del modelo. En esta parte es posible definir ciertos parámetros en función de valores bien conocidos dentro del ME, como por ejemplo, el ángulo de Weinberg, la constante de estructura fina, la carga del electrón, etc...

Finalmente, el último archivo antes de completar el modelo implementado en SARAH y así ejecutarlo para obtener las salidas analíticas en MATHEMATICA es el archivo `particles.m`. Este archivo está relacionado con las partículas del modelo. Aunque la información básica ya se ingresó en el archivo principal, hay algunos detalles adicionales que se deben incluir en este archivo. Así como `parameters.m`, este archivo es opcional pero se recomienda implementarlos cuando el modelo cuenta con parámetros y partículas poco comunes que SARAH no pueda identificar causando un error, además cuando se requiera generar los archivos especiales de salida de SARAH para SPheno, \LaTeX , etc. En `particles.m`, por ejemplo, se ingresa la carga de las partículas, se define el valor numérico (en caso de ser conocido) de las masas de algunas partículas, o se define la manera en que los programas externos pueden leer sus valores usando un archivo de entrada generado por SPheno. También está la opción de presentar cómo las partículas deberían mostrarse en el formato \LaTeX [24, 25].

4. Resultados Analíticos

Una vez implementado el modelo, primero se debe cargar el paquete SARAH desde MATHEMATICA ejecutando la siguiente orden:

```
<< /home/.Mathematica/Applications/SARAH-X.Y.Z/SARAH.m
```

donde X.Y.Z indica los tres dígitos de la versión usada para SARAH. Esta orden carga el paquete y despliega información sobre SARAH:

SARAH 4.14.3

by Florian Staub, 2018

contributions by M. Gabelmann, M. D. Goodsell, K. Nickel

References:

- Comput.Phys.Commun.181 (2010) 1077–1086. (arXiv:0909.2863[hep-ph])
 Comput.Phys.Commun.182 (2011) 808–833. (arXiv:1002.0840[hep-ph])
 Comput.Phys.Commun.184 (2013) 1792–1809. (arXiv:1207.0906[hep-ph])
 Comput.Phys.Commun.185 (2014) 1773–1790. (arXiv:1309.7223[hep-ph])

Download and Documentation:<http://sarah.hepforge.org>

Start evaluation of a model with:

`Start["Name of Model"]`e.g. `Start["MSSM"]` or `Start["NMSSM","CKM"]`To get a list with all installed models, use `ShowModels`

Al final se muestra la forma en que debe iniciar el modelo implementado; para nuestro caso debemos ejecutar

```
Start["331/v3"]
```

SARAH empieza verificando que el modelo cumpla con los requerimientos básicos, como preservar la carga en cada término del modelo y que el sector de Gauge esté adecuadamente construido, es decir, se deben especificar correctamente los bosones de Goldstone que representarán los grados de libertad que requieran los bosones masivos para adquirir masa. Asimismo, se debe verificar que la mezcla y los pseudoescalares en el sector de Higgs se encuentren bien definidos. Después de ello, el programa encontrará todos los vértices del modelo, las matrices de masa, las ecuaciones Tadpoles y en caso de ser necesario, también encuentra correcciones a 1-loop para las Tadpoles, las auto-energías y hasta 2-loops para las ecuaciones del grupo de renormalización.

Como resultado de la ejecución se obtienen las simetrías de Gauge, todos los campos del modelo, el Lagrangiano completamente expandido, las matrices de mezcla de los bosones de Gauge, las matrices de rotación de masa tanto para los bosones de Gauge como para los campos escalares del modelo, neutros y cargados, las matrices de masa para quarks y leptones una vez que hayan interactuado con el sector del Higgs. Inclusive se tiene la opción de exportar los resultados analíticos a archivos \LaTeX para obtener un archivo PDF como resultado de una compilación, el cual incluya todos los detalles del modelo, en donde hasta los vértices son graficados después de usar el programa de \LaTeX -feynmf. Todo esto muestra que SARAH es una herramienta muy completa para realizar análisis de modelos en física de altas energías.

Parte de nuestro interés es mostrar las matrices de masa del sector de quarks, y como caso siguiente, determinar a través de SPheno los valores numéricos de las masas de dichos quarks. Por lo tanto, a continuación mostramos las matrices de masa analíticas que se obtienen al ejecutar el programa en SARAH con tres tripletes escalares.

Para obtener la matriz de masa del sector Up de quarks se debe ejecutar el comando:

```
MatrixForm[MassMatrix[Fu]]
```

y SARAH retorna la forma conocida de la matriz de masa,

$$\begin{pmatrix} v_2 \text{hup11}[1] & v_2 \text{hup11}[2] & v_2 \text{hup11}[3] & \text{hUp1 } v_2 \\ v_2 \text{hup21}[1] & v_2 \text{hup21}[2] & v_2 \text{hup21}[3] & \text{hUp2 } v_2 \\ v_1 \text{hu12}[1] & v_1 \text{hu12}[2] & v_1 \text{hu12}[3] & \text{hU2 } v_1 \\ V \text{hu11}[1] & V \text{hu11}[2] & V \text{hu11}[3] & \text{hU1 } V \end{pmatrix}$$

Para poder compararla con la publicada en la literatura, esta matriz se puede reescribir en la forma:

$$M_u = \begin{pmatrix} v_2 h_{11}^{u'} & v_2 h_{12}^{u'} & v_2 h_{13}^{u'} & v_2 h_1^{U'} \\ v_2 h_{21}^{u'} & v_2 h_{22}^{u'} & v_2 h_{23}^{u'} & v_2 h_2^{U'} \\ v_1 h_{12}^u & v_1 h_{22}^u & v_1 h_{32}^u & v_1 h_2^U \\ V h_{11}^u & V h_{21}^u & V h_{31}^u & V h_1^U \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Ahora para el sector Down de quarks se debe ejecutar el mismo comando, pero cambiando el estado Fu por Fd, es decir:

```
MatrixForm[MassMatrix[Fd]]
```

y SARAH nuevamente retorna la forma conocida de la matriz de masa para este sector,

$$\begin{pmatrix} v_1 \text{hd1}[1] & v_1 \text{hd1}[2] & v_1 \text{hd1}[3] & v_1 \text{hdt1}[1] & v_1 \text{hdt1}[2] \\ v_1 \text{hd2}[1] & v_1 \text{hd2}[2] & v_1 \text{hd2}[3] & v_1 \text{hdt2}[1] & v_1 \text{hdt2}[2] \\ v_2 \text{hd3}[1] & v_2 \text{hd3}[2] & v_2 \text{hd3}[3] & v_2 \text{hdt3}[1] & v_2 \text{hdt3}[2] \\ V \text{hdp11}[1] & V \text{hdp11}[2] & V \text{hdp11}[3] & V \text{hdtp11}[1] & V \text{hdtp11}[2] \\ V \text{hdp1}[1] & V \text{hdp1}[2] & V \text{hdp1}[3] & V \text{hdtp1}[1] & V \text{hdtp1}[2] \end{pmatrix}$$

Al igual que la anterior matriz, la reescribimos para compararla con la publicada en la literatura:

$$M_d = \begin{pmatrix} v_1 h_{11}^d & v_1 h_{12}^d & v_1 h_{13}^d & v_1 h_{11}^D & v_1 h_{12}^D \\ v_1 h_{21}^d & v_1 h_{22}^d & v_1 h_{23}^d & v_1 h_{21}^D & v_1 h_{22}^D \\ v_2 h_{31}^d & v_2 h_{32}^d & v_2 h_{33}^d & v_2 h_{31}^D & v_2 h_{32}^D \\ V h_{11}^{d'} & V h_{12}^{d'} & V h_{13}^{d'} & V h_{11}^{D'} & v_2 h_{12}^{D'} \\ V h_{21}^{d'} & V h_{22}^{d'} & V h_{23}^{d'} & V h_{11}^{D'} & V h_{22}^{D'} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Si estas matrices se comparan con las presentadas en la Ref. [23], salvo algún cambio de notación en los subíndices de las constantes de Yukawa, son iguales. En este trabajo evitamos usar una mayor cantidad de subíndices para facilitar la implementación del lagrangiano del modelo en SARAH, por ejemplo, para el sector Down, en lugar de escribir h_{211}^d usamos $h_{11}^{d'}$. Lo importante es verificar que las constantes de Yukawa sean diferentes una respecto a la otra. Al considerar lo anterior, se muestra que la implementación en SARAH concuerda.

Ya el lector puede indagar en las diferentes salidas de SARAH, como las matrices de masa de los leptones, las matrices para los escalares cargados y neutros, las matrices de los bosones de Gauge, etc. Para mayor información de cómo obtener más salidas, remitirse a [24,25], donde encontrará toda la información que se puede extraer desde SARAH. Vale la pena recordar que por primera vez se realiza la implementación de este modelo en SARAH y que la presentamos completamente en el Apéndice A.

5. Resultados Numéricos usando SPheno

Al tener certeza de que los resultados analíticos obtenidos con SARAH concuerdan con los publicados en la literatura, se procede a realizar cálculos numéricos usando el programa SPheno, con el objetivo de obtener las masas del sector de quarks para el caso con tres tripletes de Higgs. Estos cálculos numéricos se realizan a nivel árbol, la cual representa una de las opciones dadas por el programa de SPheno.

Al ser SARAH un paquete de MATHEMATICA, no es lo más indicado para realizar estudios numéricos pesados [25]. No obstante, se utiliza para generar los archivos de entrada (que llamaremos *módulo*) requeridos para ejecutar SPheno. SPheno es un programa escrito en lenguaje Fortran, el cual provee de rutinas que permiten la evaluación numérica de todos los vértices, masas y modos de decaimiento en un modelo determinado.

Para crear un módulo de SPheno con SARAH se necesitan hacer dos cosas: (1) crear el archivo SPheno.m (ya mencionado en la Sec. 4 y mostrado en detalle en el Apéndice 6 para nuestro modelo 3-3-1 con tres tripletes escalares) y (2) ejecutar el siguiente comando en MATHEMATICA después de cargar SARAH e inicializar el modelo:

```
MakeSPheno[ ]
```

Después de unos minutos, el módulo de SPheno será creado y localizado en el directorio Output de SARAH. Una vez creado, se debe copiar en el directorio principal de SPheno y luego se necesita compilar, escribiendo en un terminal:

```
$make Model=331v3
```

y esperar hasta que la compilación termine con éxito. Cuando esto suceda, ya queda listo para usar nuestro código de SPheno ejecutando:

```
$bin/SPheno331v3 LesHouches.in.331v3_low ,
```

donde LesHouches es el archivo que contiene los valores numéricos de entrada para las constantes físicas del modelo.

```
Block MODSEL #
  1 0 # 1/0: High/low scale
      input
  2 1 # Boundary Condition
  6 1 # Generation Mixing
 12 173.5 # Renormalization scale
Block SMINPUTS # Standard Model inputs
  2 1.166370E-05 # G_F,Fermi constant
  3 1.187000E-01 # alpha_s(MZ) SM MSbar
  4 9.118870E+01 # Z-boson pole mass
  5 4.180000E+00 # m_b(mb) SM MSbar
  6 1.735000E+02 # m_top(pole)
  7 1.776690E+00 # m_tau(pole)
Block MINPAR # Input parameters
 11 5.00E+03 # VnIN
 12 1.00E+02 # v1IN
 13 2.45E+02 # v2IN
```

Por ejemplo, en este archivo se especifican los valores de expectación en el vacío, para nuestro caso tenemos: $v_1 =$

100 , $v_2 = 245$, y $V = 5000$ GeV. El valor de v_1 se puede mover desde 1 GeV hasta $v_1 \approx v_2$, y V dentro de la escala de los TeV, para garantizar el valor de las masas de los valores de las partículas exóticas.

Con los valores de expectación mencionados anteriormente se obtiene la solución más simple para el sector Up de los quarks:

$$M_{up} = h_{11}^{u'} v_2, M_c = h_{22}^{u'} v_2, M_t = h_{32}^u v_1 \text{ y } M_U = h_1^U V,$$

con todas las otras constantes de Yukawa de la matriz de la Ec. (2) iguales a cero. Al fijar en el archivo de entrada LesHouches del módulo de SPheno las constantes de Yukawa en los siguientes valores:

$$h_{11}^{u'} = 9.35 \times 10^{-6}, h_{22}^{u'} = 0.7053, h_{32}^u = 0.01275, h_1^U = 1,$$

se obtienen de manera adecuada los valores de masa de los quarks reportados en el Particle Data Group (PDG) [29], y un valor de masa para el quark exótico de 5 TeV, el cual fácilmente se puede modificar al cambiar el valor de la constante h_1^U .

Si se produce de la misma manera para el sector down se tiene:

$$M_d = h_{11}^d v_1, M_s = h_{22}^d v_1, M_b = h_{33}^d v_2, M_{D1} = h_{11}^{D'} V \text{ y } M_{D2} = h_2^{D'} V;$$

donde las otras constantes de Yukawa de la matriz de la Ec. (3) son iguales a cero. Nuevamente, al fijar en el archivo de entrada LesHouches del módulo de SPheno las constantes de Yukawa en los siguientes valores:

$$h_{11}^d = 0.000048, h_{22}^d = 0.00095, h_{33}^d = 0.016992, h_{11}^{D'} = 0.3 \text{ y } h_2^{D'} = 0.6,$$

se obtienen de manera adecuada los valores de masa de los tres quarks tipo down reportadas en el PDG y los valores de masa de 1.5 TeV y 3 TeV para los quarks exóticos, respectivamente. Estos últimos valores fácilmente se pueden variar al cambiar los valores de $h_{11}^{D'}$ y $h_2^{D'}$. La selección de las constantes de Yukawa anteriormente mencionadas es una posibilidad de muchas que se podrían elegir en las matrices (2) y (3).

Los resultados numéricos calculados por SPheno son guardados en múltiples archivos generados en el directorio principal. Los anteriores valores correspondientes a la masas son guardados en el archivo llamado SPheno.spc.331v3. Este contiene todos los detalles del espectro de masas del modelo:

Block	MASS	#	Mass spectrum	
#	PDG code	mass	particle	
	36	4.50435683E+03	# Ah_3	
	41	4.46524104E+03	# Dpm_2	
	1	4.80000000E-03	# Fd_1	
	3	9.50000000E-02	# Fd_2	
	5	4.18377991E+00	# Fd_3	
	1001	1.50000000E+03	# Fd_4	
	1003	3.00000000E+03	# Fd_5	
	11	5.10998930E-04	# Fe_1	
	13	1.05658372E-01	# Fe_2	
	15	1.77669000E+00	# Fe_3	
	2	2.30216232E-03	# Fu_1	
	4	1.27500000E+00	# Fu_2	

6	1.73659367E+02	# Fu_3
1006	5.00000000E+03	# Fu_4
25	1.03211827E+02	# hh_1
35	2.23656366E+03	# hh_2
1035	4.50404752E+03	# hh_3
37	2.30145102E+03	# Hpm_3
39	5.10386526E+03	# Hpm_4
24	8.03497269E+01	# VWp
224	2.34618648E+03	# VXP
23	9.11887000E+01	# VZ
2023	3.85889765E+03	# VZp

donde Fu_i y Fd_i representan los estados de los cuatro quarks Up y los cinco quarks Down, respectivamente.

Todo lo anterior demuestra que el modelo $3-3-1$ con tres tripletes funciona correctamente generando las masas de los quarks.

6. Conclusiones

Hemos mostrado que el paquete SARAH del programa MATHEMATICA genera correctamente las matrices de masa analíticas para el modelo $3-3-1$ con neutrinos derechos, para el caso con tres tripletes escalares, lo cual muestra la gran herramienta computacional con la que contamos en física de altas energías. SARAH permite calcular no solo masas fermiónicas, sino también para los bosones de Gauge, análisis del

sector del Higgs, corrientes etc. Con ello, se reduce el tiempo de realización de cálculos analíticos, a nivel de árbol y a mayor orden perturbativo. Luego, usando SPheno, que es un programa complementario para realizar cálculos numéricos, hemos obtenido las masas de los quarks del modelo para mostrar que estas herramientas computacionales funcionan.

Tener tres tripletes escalares genera adecuadamente todas las masas de los quarks a nivel árbol, para este modelo, y con lo cual podemos concluir que al menos, en la generación de masas de los quarks es un modelo realista.

Apéndice

A. Modelo 331 con tres tripletes de Higgs en SARAH

A continuación mostramos los cuatro archivos que se requieren para ejecutar SARAH y generar el módulo de SPheno para el modelo con tres tripletes de Higgs. Por defecto, el programa SPheno siempre escribe en el espectro de masas de salida los valores conocidos experimentalmente de las masas de los quarks del Modelo Estándar. Para evitar esto se desactivaron las líneas 802-805 del archivo LoopMasses_331v4.f90 de nuestro módulo de SPheno, esto con el propósito de que SPheno calcule las respectivas masas de acuerdo con los parámetros propios del modelo.

A.1 Archivo 331-v3.m

```

1 (* ::Package:: *)
2
3 Off[General::spell]
4
5 Model`Name = "331v3";
6 Model`NameLaTeX = "3-3-1_Model_with_Right-Handed_Neutrinos";
7 Model`Authors = "R. Benavides & A. Tapia";
8 Model`Date = "2019-02-15";
9
10 (*-----*)
11 (* Particle Content *)
12 (*-----*)
13
14 (* Gauge Superfields *)
15
16 Gauge[[1]] = {B, U[1], xcharge, g1, False, 0, 1};
17 Gauge[[2]] = {WB, SU[3], left, g2, True, 0, 1};
18 Gauge[[3]] = {G, SU[3], color, g3, False, 0, 1};
19
20 (* Chiral Superfields *)
21
22 FermionFields[[1]] = {Q1, 1, {dt1L, d1L, u1L}, 0, 3, 3};
23 FermionFields[[2]] = {Q2, 1, {dt2L, d2L, u2L}, 0, 3, 3};
24 FermionFields[[3]] = {Q3, 1, {UL, u3L, d3L}, 1/3, -3, 3};
25 FermionFields[[4]] = {u, 3, conj[uR], -2/3, 1, -3};
26 FermionFields[[5]] = {ut, 1, conj[utR], -2/3, 1, -3};
27 FermionFields[[6]] = {d, 3, conj[dR], 1/3, 1, -3};
28 FermionFields[[7]] = {dt, 2, conj[dtR], 1/3, 1, -3};
29
30 FermionFields[[8]] = {1, 3, {conj[v0L], v0L, eL}, -1/3, -3, 1};
31 FermionFields[[9]] = {e, 3, conj[eR], 1, 1, 1};
32
33 (*The same than above*)
34 ScalarFields[[1]] = {phi1, 1, {phi10p, phi10, phi1m}, 1/3, 3, 1};
35 ScalarFields[[2]] = {phi2, 1, {phi20p, phi20, phi2m}, 1/3, 3, 1};
36 ScalarFields[[3]] = {phi3, 1, {phi3pp, phi3p, phi30}, -2/3, 3, 1};
37
38 (*-----*)
39 (* DEFINITION *)
40 (*-----*)
41
42 NameOfStates = {GaugeES, EWSB};
43
44 (*----- Before EWSB -----*)
45
46 DEFINITION[GaugeES][Additional] = {
47   {LagHC, {Overwrite->True, AddHC->True}},
48   {LagNoHC, {Overwrite->True, AddHC->False}}
49 };
50
51
52
53 (***** Yukawa Lagrangian *****)

```

```

54 (*--Up Quark Sector --*)
55 LagQuarkUp = hU1 Q3.ut.phi1 + hU2 Q3.ut.phi2 + hu11 Q3.u.phi1 + hu12 Q3.u.phi2 + hup11 Q1.u.conj[phi3] + hup21 Q2.u.conj[phi3] + hUp1 Q1.ut.conj[phi3] + hUp2 Q2.ut.
56   conj[phi3];
57
58 (*--Down Quark Sector --*)
59 LagQuarkDown = hdp11 Q1.d.conj[phi1] + hdp1 Q2.d.conj[phi1] + hd1 Q1.d.conj[phi2] + hd2 Q2.d.conj[phi2] + hdp11 Q1.dt.conj[phi1] + hdp1 Q2.dt.conj[phi1] + hdt1 Q1.dt
60   .conj[phi2] + hdt2 Q2.dt.conj[phi2] + hdt3 Q3.dt.phi3 + hdt3 Q3.d.phi3;
61
62 (*--Lepton Sector --*)
63 LagLep = h111 1.e.phi3 + h121 1.l.conj[phi3];
64
65 (*--Scalar potential --*)
66 Vpot1a = mu12 conj[phi1].phi1 - mu22 conj[phi2].phi2 - mu32 conj[phi3].phi3;
67 Vpot1b = - 1/2 11 conj[phi1].phi1.conj[phi1].phi1 - 1/2 12 conj[phi2].phi2.conj[phi2].phi2 - 1/3 13 conj[phi3].phi3.conj[phi3].phi3;
68 Vpot2 = - 112 conj[phi1].phi1.conj[phi2].phi2 - 113 conj[phi1].phi1.conj[phi3].phi3 - 123 conj[phi2].phi2.conj[phi3].phi3;
69 Vpot3 = - 112t conj[phi1].phi2.conj[phi2].phi1 - 113t conj[phi1].phi3.conj[phi3].phi1 - 123t conj[phi2].phi3.conj[phi3].phi2;
70 Vpot4 = - Sqrt[2] ftri phi1.phi2.phi3;
71
72 LagNoHC = Vpot1a + Vpot1b + Vpot2 + Vpot3 + Vpot4;
73 LagHC = LagLep + LagQuarkUp + LagQuarkDown;
74
75 (* Gauge Sector *)
76 DEFINITION[EWSB][ GaugeSector ] =
77 {
78   {{VB,VWB[7],VWB[8]},{VP,VZ,VZp},ZZ},
79   {{VWB[2],VWB[5],VWB[6],VWB[3]},{VWp,conj[VWp],VXp,conj[VXp]},ZW}
80 };
81
82 (*-----VEVs-----*)
83 DEFINITION[EWSB][VEVs]=
84 {
85   {phi10p, {V, -1/Sqrt[1]}, {A1, I/Sqrt[2]}, {h1, 1/Sqrt[2]}},
86   {phi20, {v1, -1/Sqrt[1]}, {A2, I/Sqrt[2]}, {h2, 1/Sqrt[2]}},
87   {phi30, {v2, -1/Sqrt[1]}, {A3, I/Sqrt[2]}, {h3, 1/Sqrt[2]}}
88 };
89
90 DEFINITION[EWSB][ MatterSector ]=
91 {
92   {{h1,h2,h3},{hh,ZH}},
93   {{A1,A2,A3},{Ah,ZA}},
94   {{conj[phi1m],conj[phi2m],phi3p,phi3pp},{Hpm,ZP}},
95   {{conj[phi10], phi20p},{Dpm,ZY}},
96   {{dtL, d2L, d3L, dt1L, dt2L},{conj[dR], conj[dtR]},{FDL,Vd},{FDR,Ud}},
97   {{{uL, u2L, u3L, UL},{conj[uR], conj[utR]},{FUL,Vu},{FUR,Uu}},
98   {{{eL},{conj[eR]},{FEL,Ve},{FER,Ue}}}
99 };
100
101 (*-----*)
102 (* Dirac-Spinors *)
103 (*-----*)
104
105 DEFINITION[EWSB][ DiracSpinors ]={
106   Fd ->{ FDL, conj[FDR]},
107   Fe ->{ FEL, conj[FER]},
108   Fu ->{ FUL, conj[FUR]},
109   Fv1 ->{v0L, 0 };
110
111 DEFINITION[ GaugeES ][ DiracSpinors ]={
112   Fd1 ->{ FdL, 0 },
113   Fd2 ->{ 0, FdR },
114   Fu1 ->{ FuL, 0 },
115   Fu2 ->{ 0, FuR },
116   Fe1 ->{ FeL, 0 },
117   Fe2 ->{ 0, FeR };
118

```

A.2 Archivo parameters.m

```

1 (* SARAH generated template for parameters.m file for 331v3*)
2 (* File created at 12:01 on 31.5.2019 *)
3 (* IMPORTANT: *)
4 (* check/adjust in particular the lines which contain "CHECK!" *)
5 (* the correct information is needed there to have correct results! *)
6
7
8 ParameterDefinitions = {
9
10 (*-----Already defined parameters in existing parameters.m-----*)
11
12 {aEWinv,{
13   Description ->"inverse_weak_coupling_constant_at_mZ",
14   Dependence ->None,
15   DependenceNum ->None,
16   DependenceOptional ->None,
17   DependenceSPHeno ->None,
18   Real ->True,
19   Value ->137.035999679,
20   LesHouches ->{SMINPUTS,1},
21   LaTeX ->"\alpha^{-1}",
22   OutputName ->aEWinv}},
23
24 {AlphaS,{
25   Description ->"Alpha_Strong",
26   Dependence ->None,
27   DependenceNum ->None,
28   DependenceOptional ->None,
29   DependenceSPHeno ->None,
30   Real ->True,
31   Value ->0.119,

```

```

32 LesHouches -> {SMINPUTS, 3},
33 LaTeX -> "\alpha_S",
34 OutputName -> aS},
35
36 {e,{
37   Description -> "electric_charge",
38   Dependence -> None,
39   DependenceNum -> 2*Sqrt[aEWinv^(-1)]*Sqrt[Pi],
40   DependenceOptional -> None,
41   DependenceSPheno -> None,
42   Real -> True,
43   LaTeX -> "e",
44   OutputName -> e1}},
45
46 {ftri,{
47   Dependence -> None,
48   DependenceNum -> None,
49   DependenceOptional -> None,
50   DependenceSPheno -> None,
51   Real -> True,
52   LesHouches -> {POTENTIAL331, 5},
53   LaTeX -> "\epsilon",
54   OutputName -> ftri}},
55
56 {g1,{
57   Description -> "X-Coupling",
58   Dependence -> None,
59   DependenceNum -> None,
60   DependenceOptional -> None,
61   DependenceSPheno -> None,
62   Real -> True,
63   LesHouches -> {gauge, 1},
64   LaTeX -> "g_1",
65   OutputName -> g1}},
66
67 {g2,{
68   Description -> "Left-Coupling",
69   Dependence -> None,
70   DependenceNum -> e*Csc[ThetaW],
71   DependenceOptional -> e*Csc[ThetaW],
72   DependenceSPheno -> None,
73   Real -> True,
74   LesHouches -> {gauge, 2},
75   LaTeX -> "g_2",
76   OutputName -> g2}},
77
78 {g3,{
79   Description -> "Strong-Coupling",
80   Dependence -> None,
81   DependenceNum -> 2*Sqrt[AlphaS]*Sqrt[Pi],
82   DependenceOptional -> None,
83   DependenceSPheno -> None,
84   Real -> True,
85   LesHouches -> {gauge, 3},
86   LaTeX -> "g_3",
87   OutputName -> g3}},
88
89 {Gf,{
90   Description -> "Fermi's_constant",
91   Dependence -> None,
92   DependenceNum -> None,
93   DependenceOptional -> None,
94   DependenceSPheno -> None,
95   Real -> True,
96   Value -> 0.0000116639,
97   LesHouches -> {SMINPUTS, 2},
98   LaTeX -> "G_F",
99   OutputName -> Gf}},
100
101 {h121,{
102   Dependence -> None,
103   DependenceNum -> None,
104   DependenceOptional -> None,
105   DependenceSPheno -> None,
106   Real -> False,
107   LesHouches -> h121,
108   LaTeX -> "h_{121}",
109   OutputName -> h121}},
110
111 {hd3,{
112   Dependence -> None,
113   DependenceNum -> None,
114   DependenceOptional -> None,
115   DependenceSPheno -> None,
116   Real -> False,
117   LesHouches -> hd3,
118   LaTeX -> "h_{d}_{3}",
119   OutputName -> hd3}},
120
121 {hdp11,{
122   Dependence -> None,
123   DependenceNum -> None,
124   DependenceOptional -> None,
125   DependenceSPheno -> None,
126   Real -> False,
127   LesHouches -> hdp11,
128   LaTeX -> "h_{d}_{11}",
129   OutputName -> hdp11}},
130
131 {hd1,{
132   Dependence -> None,
133   DependenceNum -> None,
134   DependenceOptional -> None,
135   DependenceSPheno -> None,
136   Real -> False,
137   LesHouches -> hd1,
138   LaTeX -> "h_{d}_{1}",
139   OutputName -> hd1}},
140
141 {hdp1,{
142   Dependence -> None,

```

```

143     DependenceNum -> None,
144     DependenceOptional -> None,
145     DependenceSPheno -> None,
146     Real -> False,
147     LesHouches -> hdp1,
148     LaTeX -> "h{d}",
149     OutputName -> hdp1}},
150
151 {hd2,{
152     Dependence -> None,
153     DependenceNum -> None,
154     DependenceOptional -> None,
155     DependenceSPheno -> None,
156     Real -> False,
157     LesHouches -> hd2,
158     LaTeX -> "h{d}",
159     OutputName -> hd2}},
160
161 {hdt3,{
162     Dependence -> None,
163     DependenceNum -> None,
164     DependenceOptional -> None,
165     DependenceSPheno -> None,
166     Real -> False,
167     LesHouches -> hdt3,
168     LaTeX -> "h{D}",
169     OutputName -> hdt3}},
170
171 {hdp11,{
172     Dependence -> None,
173     DependenceNum -> None,
174     DependenceOptional -> None,
175     DependenceSPheno -> None,
176     Real -> False,
177     LesHouches -> hdp11,
178     LaTeX -> "h{D}",
179     OutputName -> hdp11}},
180
181 {hdt1,{
182     Dependence -> None,
183     DependenceNum -> None,
184     DependenceOptional -> None,
185     DependenceSPheno -> None,
186     Real -> False,
187     LesHouches -> hdt1,
188     LaTeX -> "h{D}",
189     OutputName -> hdt1}},
190
191 {hdp1,{
192     Dependence -> None,
193     DependenceNum -> None,
194     DependenceOptional -> None,
195     DependenceSPheno -> None,
196     Real -> False,
197     LesHouches -> hdp1,
198     LaTeX -> "h{D}",
199     OutputName -> hdp1}},
200
201 {hdt2,{
202     Dependence -> None,
203     DependenceNum -> None,
204     DependenceOptional -> None,
205     DependenceSPheno -> None,
206     Real -> False,
207     LesHouches -> hdt2,
208     LaTeX -> "h{D}",
209     OutputName -> hdt2}},
210
211 {h111,{
212     Dependence -> None,
213     DependenceNum -> None,
214     DependenceOptional -> None,
215     DependenceSPheno -> None,
216     Real -> False,
217     LesHouches -> h111,
218     LaTeX -> "h_{111}",
219     OutputName -> h111}},
220
221 {hU1,{
222     Dependence -> None,
223     DependenceNum -> None,
224     DependenceOptional -> None,
225     DependenceSPheno -> None,
226     Real -> False,
227     LesHouches -> hU1,
228     LaTeX -> "h^u_1",
229     OutputName -> hU1}},
230
231 {hu11,{
232     Dependence -> None,
233     DependenceNum -> None,
234     DependenceOptional -> None,
235     DependenceSPheno -> None,
236     Real -> False,
237     LesHouches -> hu11,
238     LaTeX -> "h^u_{11}",
239     OutputName -> hu11}},
240
241 {hu12,{
242     Dependence -> None,
243     DependenceNum -> None,
244     DependenceOptional -> None,
245     DependenceSPheno -> None,
246     Real -> False,
247     LesHouches -> hu12,
248     LaTeX -> "h^u_{12}",
249     OutputName -> hu12}},
250
251 {hU2,{
252     Dependence -> None,
253     DependenceNum -> None,

```

```

254     DependenceOptional → None,
255     DependenceSPheno → None,
256     Real → False,
257     LesHouches → hU2,
258     LaTeX → "h^U.2",
259     OutputName → hU2}},
260
261 {hUp1,{
262     Dependence → None,
263     DependenceNum → None,
264     DependenceOptional → None,
265     DependenceSPheno → None,
266     Real → False,
267     LesHouches → hUp1,
268     LaTeX → "h^{U}_{1}",
269     OutputName → hUp1}},
270
271 {hup11,{
272     Dependence → None,
273     DependenceNum → None,
274     DependenceOptional → None,
275     DependenceSPheno → None,
276     Real → False,
277     LesHouches → hup11,
278     LaTeX → "h^{u}_{11}",
279     OutputName → hup11}},
280
281 {hUp2,{
282     Dependence → None,
283     DependenceNum → None,
284     DependenceOptional → None,
285     DependenceSPheno → None,
286     Real → False,
287     LesHouches → hUp2,
288     LaTeX → "h^{U}_{2}",
289     OutputName → hUp2}},
290
291 {hup21,{
292     Dependence → None,
293     DependenceNum → None,
294     DependenceOptional → None,
295     DependenceSPheno → None,
296     Real → False,
297     LesHouches → hup21,
298     LaTeX → "h^{u}_{21}",
299     OutputName → hup21}},
300
301 {11,{
302     Dependence → None,
303     DependenceNum → None,
304     DependenceOptional → None,
305     DependenceSPheno → None,
306     Real → False,
307     LesHouches → {POTENTIAL331, 6},
308     LaTeX → "\lambda_{11}",
309     OutputName → 11}},
310
311 {112,{
312     Dependence → None,
313     DependenceNum → None,
314     DependenceOptional → None,
315     DependenceSPheno → None,
316     Real → False,
317     LesHouches → {POTENTIAL331, 11},
318     LaTeX → "\lambda_{12}",
319     OutputName → 112}},
320
321 {112t,{
322     Dependence → None,
323     DependenceNum → None,
324     DependenceOptional → None,
325     DependenceSPheno → None,
326     Real → False,
327     LesHouches → {POTENTIAL331, 16},
328     LaTeX → "\tilde{\lambda}_{12t}",
329     OutputName → 112t}},
330
331 {113,{
332     Dependence → None,
333     DependenceNum → None,
334     DependenceOptional → None,
335     DependenceSPheno → None,
336     Real → False,
337     LesHouches → {POTENTIAL331, 12},
338     LaTeX → "\lambda_{13}",
339     OutputName → 113}},
340
341 {113t,{
342     Dependence → None,
343     DependenceNum → None,
344     DependenceOptional → None,
345     DependenceSPheno → None,
346     Real → False,
347     LesHouches → {POTENTIAL331, 15},
348     LaTeX → "\tilde{\lambda}_{13t}",
349     OutputName → 113t}},
350
351 {12,{
352     Dependence → None,
353     DependenceNum → None,
354     DependenceOptional → None,
355     DependenceSPheno → None,
356     Real → False,
357     LesHouches → {POTENTIAL331, 7},
358     LaTeX → "\lambda_{2}",
359     OutputName → 12}},
360
361 {123,{
362     Dependence → None,
363     DependenceNum → None,
364     DependenceOptional → None,

```

```

365     DependenceSPheno -> None,
366     Real -> False,
367     LesHouches -> {POTENTIAL331, 13},
368     LaTeX -> "\\lambda_{23}",
369     OutputName -> l23}},
370
371 {l23t,{
372     Dependence -> None,
373     DependenceNum -> None,
374     DependenceOptional -> None,
375     DependenceSPheno -> None,
376     Real -> False,
377     LesHouches -> {POTENTIAL331, 14},
378     LaTeX -> "\\tilde{\lambda}_{23}",
379     OutputName -> l23t}},
380
381 {l3,{
382     Dependence -> None,
383     DependenceNum -> None,
384     DependenceOptional -> None,
385     DependenceSPheno -> None,
386     Real -> False,
387     LesHouches -> {POTENTIAL331, 8},
388     LaTeX -> "\\lambda_{3}",
389     OutputName -> l3}},
390
391 {mu12,{
392     Dependence -> None,
393     DependenceNum -> None,
394     DependenceOptional -> None,
395     DependenceSPheno -> None,
396     Real -> True,
397     LesHouches -> {POTENTIAL331, 1},
398     LaTeX -> "\\mu_1^2",
399     OutputName -> mu12}},
400
401 {mu22,{
402     Dependence -> None,
403     DependenceNum -> None,
404     DependenceOptional -> None,
405     DependenceSPheno -> None,
406     Real -> True,
407     LesHouches -> {POTENTIAL331, 2},
408     LaTeX -> "\\mu_2^2",
409     OutputName -> mu22}},
410
411 {mu32,{
412     Dependence -> None,
413     DependenceNum -> None,
414     DependenceOptional -> None,
415     DependenceSPheno -> None,
416     Real -> True,
417     LesHouches -> {POTENTIAL331, 3},
418     LaTeX -> "\\mu_3^2",
419     OutputName -> mu32}},
420
421 {ThetaW,{
422     Description -> "Weinberg-Angle",
423     Dependence -> None,
424     DependenceNum -> ArcSin[Sqrt[1 - Mass[VWp]^2/Mass[VZ]^2]],
425     DependenceOptional -> None,
426     DependenceSPheno -> ArcCos[Abs[ZZ[1, 1]]],
427     Real -> True,
428     LaTeX -> "\\Theta_W",
429     OutputName -> TW}},
430
431 {Ud,{
432     Description -> "Right-Down-Mixing-Matrix",
433     Dependence -> None,
434     DependenceNum -> None,
435     DependenceOptional -> None,
436     DependenceSPheno -> None,
437     Real -> False,
438     LesHouches -> UDRMX,
439     LaTeX -> "U^d_R",
440     OutputName -> Ud}},
441
442 {Ue,{
443     Description -> "Right-Lepton-Mixing-Matrix",
444     Dependence -> None,
445     DependenceNum -> None,
446     DependenceOptional -> None,
447     DependenceSPheno -> None,
448     Real -> False,
449     LesHouches -> UERMIX,
450     LaTeX -> "U^e_R",
451     OutputName -> Ue}},
452
453 {Uu,{
454     Description -> "Right-Up-Mixing-Matrix",
455     Dependence -> None,
456     DependenceNum -> None,
457     DependenceOptional -> None,
458     DependenceSPheno -> None,
459     Real -> False,
460     LesHouches -> UURMIX,
461     LaTeX -> "U^u_R",
462     OutputName -> Uu}},
463
464 {V,{
465     Dependence -> None,
466     DependenceNum -> None,
467     DependenceOptional -> None,
468     DependenceSPheno -> None,
469     Real -> True,
470     LesHouches -> {POTENTIAL331, 20},
471     LaTeX -> "V",
472     OutputName -> Vn}},
473
474 {v1,{
475     Dependence -> None,

```

```

476 DependenceNum -> None,
477 DependenceOptional -> None,
478 DependenceSPheno -> None,
479 Real -> True,
480 LesHouches -> {POTENTIAL331, 18},
481 LaTeX -> "v_{1}",
482 OutputName -> v1}},
483
484 {v2,{
485   Dependence -> None,
486   DependenceNum -> None,
487   DependenceOptional -> None,
488   DependenceSPheno -> None,
489   Real -> True,
490   LesHouches -> {POTENTIAL331, 19},
491   LaTeX -> "v_{2}",
492   OutputName -> v2}},
493
494 {Vd,{
495   Description -> "Left-Down-Mixing-Matrix",
496   Dependence -> None,
497   DependenceNum -> None,
498   DependenceOptional -> None,
499   DependenceSPheno -> None,
500   Real -> False,
501   LesHouches -> UDL MIX,
502   LaTeX -> "U^d L",
503   OutputName -> Vd}},
504
505 {Ve,{
506   Description -> "Left-Lepton-Mixing-Matrix",
507   Dependence -> None,
508   DependenceNum -> None,
509   DependenceOptional -> None,
510   DependenceSPheno -> None,
511   Real -> False,
512   LesHouches -> UEL MIX,
513   LaTeX -> "U^e L",
514   OutputName -> Ve}},
515
516 {Vu,{
517   Description -> "Left-Up-Mixing-Matrix",
518   Dependence -> None,
519   DependenceNum -> None,
520   DependenceOptional -> None,
521   DependenceSPheno -> None,
522   Real -> False,
523   LesHouches -> UUL MIX,
524   LaTeX -> "U^u L",
525   OutputName -> Vu}},
526
527 {ZA,{
528   Description -> "Pseudo-Scalar-Mixing-Matrix",
529   Dependence -> None,
530   DependenceNum -> None,
531   DependenceOptional -> None,
532   DependenceSPheno -> None,
533   Real -> False,
534   LesHouches -> ZAMIX,
535   LaTeX -> "Z{A}",
536   OutputName -> ZA}},
537
538 {ZH,{
539   Description -> "Scalar-Mixing-Matrix",
540   Dependence -> None,
541   DependenceNum -> None,
542   DependenceOptional -> None,
543   DependenceSPheno -> None,
544   Real -> False,
545   LesHouches -> ZHMIX,
546   LaTeX -> "Z{H}",
547   OutputName -> ZH}},
548
549 {ZP,{
550   Description -> "Charged-Mixing-Matrix",
551   Dependence -> None,
552   DependenceNum -> None,
553   DependenceOptional -> None,
554   DependenceSPheno -> None,
555   Real -> False,
556   LesHouches -> ZPMIX,
557   LaTeX -> "Z{\pm}",
558   OutputName -> ZP}},
559
560 {ZW,{
561   Description -> "Charged_gauge_boson_Mixing_Matrix",
562   Dependence -> {{1/Sqrt[2], 1/Sqrt[2], 0, 0}, {(-1)/Sqrt[2], 1/Sqrt[2], 0, 0}, {0, 0, -(1/Sqrt[2]), -(1/Sqrt[2])}, {0, 0, 1/Sqrt[2], (-1)/Sqrt[2]}},
563   DependenceNum -> None,
564   DependenceOptional -> None,
565   DependenceSPheno -> None,
566   Real -> False,
567   LesHouches -> ZWMIX,
568   LaTeX -> "Z{W}",
569   OutputName -> ZW}},
570
571 {ZY,{
572   Dependence -> None,
573   DependenceNum -> None,
574   DependenceOptional -> None,
575   DependenceSPheno -> None,
576   Real -> False,
577   LesHouches -> ZY,
578   LaTeX -> "Z.Y",
579   OutputName -> zy}},
580
581 {ZZ,{
582   Description -> "Neutral_gauge_boson_Mixing_Matrix",
583   Dependence -> None,
584   DependenceNum -> None,
585   DependenceOptional -> None,
586   DependenceSPheno -> None,

```

```

587 Real -> False ,
588 LesHouches -> ZZMIX ,
589 LaTeX -> "Z{Z}" ,
590 OutputName -> ZZ } ,
591
592 {Mass[VWp].{
593   Dependence -> None ,
594   DependenceNum -> None ,
595   DependenceOptional -> None ,
596   DependenceSPHeno -> None ,
597   Real -> False ,
598   LaTeX -> "M{VWp}" ,
599   OutputName -> Mvwp } }
600 }

```

A.3 Archivo particles.m

```

1 (* SARAH generated template for particles.m file for 331v3 *)
2 (* File created at 12:01 on 31.5.2019 *)
3
4 (* IMPORTANT: *)
5 (* check/adjust in particular the lines which contain "CHECK!" *)
6 (* the correct information is needed there to have correct results! *)
7
8
9 (* ##### EWSB ##### *)
10
11 ParticleDefinitions[EWSB] = {
12
13 (*-----Already defined particles in existing particles.m-----*)
14
15 {Ah,{
16   Description -> "Pseudo-Scalar_Higgs" ,
17   FeynArtsNr -> 2 ,
18   LaTeX -> "A^0" ,
19   Mass -> {0, LesHouches} ,
20   OutputName -> "Ah" ,
21   PDG -> {0, 0, 36} ,
22   ElectricCharge -> 0 ,
23   Width -> {0, External} } ,
24
25 {Dpm,{
26   Description -> "Doubly-Charged_Higgs" ,
27   FeynArtsNr -> 6 ,
28   LaTeX -> "H{\pm\pm}" ,
29   Mass -> LesHouches ,
30   OutputName -> "Dpm" ,
31   PDG -> {0, -41} ,
32   ElectricCharge -> 2 ,
33   Width -> External } ,
34
35 {Fd,{
36   Description -> "Down-Quarks" ,
37   FeynArtsNr -> 4 ,
38   LaTeX -> "d" ,
39   Mass -> {0.0035, 0.104, 4.2, LesHouches, LesHouches} ,
40   OutputName -> "Fd" ,
41   PDG -> {1, 3, 5, 1001, 1003} ,
42   ElectricCharge -> -1/3 ,
43   Width -> {0, 0, 0, 0} } ,
44
45 {Fe,{
46   Description -> "Leptons" ,
47   FeynArtsNr -> 2 ,
48   LaTeX -> "e" ,
49   Mass -> {0.000511, 0.105, 1.776} ,
50   OutputName -> "Fe" ,
51   PDG -> {11, 13, 15} ,
52   ElectricCharge -> -1 ,
53   Width -> {0, 0, 0} } ,
54
55 {Fu,{
56   Description -> "Up-Quarks" ,
57   FeynArtsNr -> 3 ,
58   LaTeX -> "u" ,
59   Mass -> {0.0015, 1.27, 171.2, LesHouches} ,
60   OutputName -> "Fu" ,
61   PDG -> {2, 4, 6, 1006} ,
62   ElectricCharge -> 2/3 ,
63   Width -> {0, 0, 1.51, 0} } ,
64
65 {Fv1,{
66   Description -> "Neutrinos" ,
67   FeynArtsNr -> 1 ,
68   LaTeX -> "\nu_1" ,
69   Mass -> {0, 0, 0} ,
70   OutputName -> "Fv1" ,
71   PDG -> {12, 14, 16} ,
72   ElectricCharge -> 0 ,
73   Width -> {0, 0, 0} } ,
74
75 {gG,{
76   Description -> "Gluon_Ghost" ,
77   FeynArtsNr -> 5 ,
78   LaTeX -> "\eta^G" ,
79   Mass -> 0 ,
80   OutputName -> "gG" ,
81   PDG -> {0} ,
82   ElectricCharge -> 0 ,
83   Width -> 0 } ,
84
85 {gP,{
86   Description -> "Photon_Ghost" ,
87   FeynArtsNr -> 1 ,
88   LaTeX -> "\eta{\gamma}" ,
89   Mass -> 0 ,

```

```

90   OutputName -> "gA",
91   PDG -> {0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
92   ElectricCharge -> 0,
93   Width -> 0}},
94
95 {gWp,{
96   Description -> "Positive_W-__Boson_Ghost",
97   FeynArtsNr -> 3,
98   LaTeX -> "\\eta^+",
99   Mass -> Mass[VWp],
100  OutputName -> "gWp",
101  PDG -> {0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
102  ElectricCharge -> 1,
103  Width -> Automatic}},
104
105 {gWpC,{
106  Description -> "Negative_W-__Boson_Ghost",
107  FeynArtsNr -> 4,
108  LaTeX -> "\\eta^-",
109  Mass -> Mass[VWp],
110  OutputName -> "gWpC",
111  PDG -> {0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
112  ElectricCharge -> -1,
113  Width -> Automatic}},
114
115 {gXp,{
116  Description -> "Positive_W-Boson_prime_Ghost",
117  FeynArtsNr -> 4,
118  LaTeX -> "\\eta^{\\prime+}",
119  Mass -> Mass[VWpm],
120  OutputName -> "gXp1",
121  PDG -> {0},
122  ElectricCharge -> 1,
123  Width -> Automatic}},
124
125 {gXpC,{
126  Description -> "Negative_W-Boson_prime_Ghost",
127  FeynArtsNr -> 3,
128  LaTeX -> "\\eta^{\\prime-}",
129  Mass -> Mass[VWpm],
130  OutputName -> "gXp2",
131  PDG -> {0},
132  ElectricCharge -> -1,
133  Width -> Automatic}},
134
135 {gZ,{
136  Description -> "Z-Boson_Ghost",
137  FeynArtsNr -> 2,
138  LaTeX -> "\\eta^Z",
139  Mass -> Mass[VZ],
140  OutputName -> "gZ",
141  PDG -> {0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
142  ElectricCharge -> 0,
143  Width -> Automatic}},
144
145 {gZp,{
146  Description -> "Z-boson_prime_Ghost",
147  FeynArtsNr -> 1,
148  LaTeX -> "\\eta^{Z{\\prime}}",
149  Mass -> 0,
150  OutputName -> "gZp",
151  PDG -> {0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
152  ElectricCharge -> 0,
153  Width -> 0}},
154
155 {hh,{
156  Description -> "Higgs",
157  FeynArtsNr -> 1,
158  LaTeX -> "h",
159  Mass -> LesHouches,
160  OutputName -> "h",
161  PDG -> {25, 35, 1035},
162  ElectricCharge -> 0,
163  Width -> Automatic}},
164
165 {Hpm,{
166  Description -> "Charged_Higgs",
167  FeynArtsNr -> 3,
168  LaTeX -> "H\\pml",
169  Mass -> LesHouches,
170  OutputName -> "Hpm",
171  PDG -> {0, 0, -37, -39},
172  ElectricCharge -> -1,
173  Width -> External}},
174
175 {VG,{
176  Description -> "Gluon",
177  FeynArtsNr -> 5,
178  LaTeX -> "g",
179  Mass -> 0,
180  OutputName -> "g",
181  PDG -> {21},
182  ElectricCharge -> 0,
183  Width -> 0}},
184
185 {VP,{
186  Description -> "Photon",
187  FeynArtsNr -> 1,
188  LaTeX -> "\\gamma",
189  Mass -> 0,
190  OutputName -> "A",
191  PDG -> {22},
192  ElectricCharge -> 0,
193  Width -> 0}},
194
195 {VWp,{
196  Description -> "W-__Boson",
197  Goldstone -> Hpm[1],
198  FeynArtsNr -> 3,
199  LaTeX -> {"W^+", "W^-"},
200  Mass -> Dependence,

```

```

201 MassDependence -> Sqrt[Mass[VZ]^2/2 + Sqrt[-(Pi*Mass[VZ]^2)/(Sqrt[2]*aEWinv*Gf)] + Mass[VZ]^4/4]],
202 OutputName -> {"Wp", "Wm"},
203 PDG -> {24},
204 ElectricCharge -> 1,
205 Width -> 2.141}},
206
207 {VXp,{
208   Description -> "W-_-Boson_prime",
209   Goldstone -> Hpm[{2}],
210   FeynArtsNr -> 3,
211   LaTeX -> {"W{\prime}^+","W{\prime}^-"},
212   Mass -> LesHouches,
213   OutputName -> {"Wpp","Wmp"},
214   PDG -> {224},
215   ElectricCharge -> 1,
216   Width -> External}},
217
218 {VZ,{
219   Description -> "Z-Boson",
220   Goldstone -> Ah[{1}],
221   FeynArtsNr -> 2,
222   LaTeX -> "Z",
223   Mass -> 91.1876,
224   OutputName -> "Z",
225   PDG -> {23},
226   ElectricCharge -> 0,
227   Width -> 2.4952}},
228
229 {VZp,{
230   Description -> "Z-Boson_prime",
231   Goldstone -> Ah[{2}],
232   FeynArtsNr -> 2,
233   LaTeX -> "Z{\prime}",
234   Mass -> LesHouches,
235   OutputName -> "Zp",
236   PDG -> {2023},
237   ElectricCharge -> 0,
238   Width -> External}},
239
240
241
242 (* ----- Additional particles in the model ----- *)
243
244 {V,{
245   Goldstone -> None,
246   FeynArtsNr -> 7 (* auto generated FeynArts number *),
247   LaTeX -> "v" (* auto generated LaTeX name *),
248   Mass -> LesHouches,
249   OutputName -> "v" (* auto generated Output name *),
250   PDG -> {2025} (* auto generated PDGs *),
251   ElectricCharge -> 0 (* this is just a dummy value for the electric charge! => CHECK! *),
252   Width -> Automatic}}
253 };
254
255
256
257 (* ##### GaugeES ##### *)
258
259 ParticleDefinitions[GaugeES] = {
260
261 (* ----- Already defined particles in existing particles.m ----- *)
262
263
264 {d1L,{
265   FeynArtsNr -> 6 (* auto generated FeynArts number *),
266   LaTeX -> "d1L",
267   Mass -> LesHouches,
268   OutputName -> "d1L" (* auto generated Output name *),
269   PDG -> {23} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
270   Width -> Automatic}},
271
272 {d2L,{
273   FeynArtsNr -> 8 (* auto generated FeynArts number *),
274   LaTeX -> "d2L",
275   Mass -> LesHouches,
276   OutputName -> "d2L" (* auto generated Output name *),
277   PDG -> {25} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
278   Width -> Automatic}},
279
280 {d3L,{
281   FeynArtsNr -> 10 (* auto generated FeynArts number *),
282   LaTeX -> "d3L",
283   Mass -> LesHouches,
284   OutputName -> "d3L" (* auto generated Output name *),
285   PDG -> {27} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
286   Width -> Automatic}},
287
288 {dR,{
289   FeynArtsNr -> 12 (* auto generated FeynArts number *),
290   LaTeX -> "dR",
291   Mass -> LesHouches,
292   OutputName -> "dR" (* auto generated Output name *),
293   PDG -> {31, 32, 33} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
294   Width -> Automatic}},
295
296 {dtr,{
297   FeynArtsNr -> 14 (* auto generated FeynArts number *),
298   LaTeX -> "d{R}",
299   Mass -> LesHouches,
300   OutputName -> "dtr" (* auto generated Output name *),
301   PDG -> {36, 37} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
302   Width -> Automatic}},
303
304 {eL,{
305   FeynArtsNr -> 16 (* auto generated FeynArts number *),
306   LaTeX -> "eL",
307   Mass -> LesHouches,
308   OutputName -> "eL" (* auto generated Output name *),
309   PDG -> {41, 42, 43} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
310   Width -> Automatic}},
311

```

```

312 {eR,{
313   FeynArtsNr -> 18 (* auto generated FeynArts number *),
314   LaTeX->"e.R",
315   Mass->LesHouches,
316   OutputName->"er" (* auto generated Output name *),
317   PDG -> {47, 48, 49} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
318   Width->Automatic}},
319
320 {gB,{
321   Description->"B-Boson_Ghost",
322   FeynArtsNr -> 1,
323   LaTeX->"\eta B",
324   Mass -> 0,
325   OutputName->"gB",
326   PDG->{0},
327   Width->0}},
328
329 {gG,{
330   Description->"Gluon_Ghost",
331   FeynArtsNr -> 5,
332   LaTeX->"\eta G",
333   Mass -> 0,
334   OutputName->"gG",
335   PDG->{0},
336   ElectricCharge -> 0,
337   Width->0}},
338
339 {gWB,{
340   Description->"W-Boson_Ghost",
341   FeynArtsNr -> 2,
342   LaTeX->"\eta W",
343   Mass -> 0,
344   OutputName->"gW",
345   PDG->{0} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
346   Width->0}},
347
348 {u1L,{
349   FeynArtsNr -> 20 (* auto generated FeynArts number *),
350   LaTeX->"u1.L",
351   Mass->LesHouches,
352   OutputName->"u1l" (* auto generated Output name *),
353   PDG->{51} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
354   Width->Automatic}},
355
356 {u2L,{
357   FeynArtsNr -> 22 (* auto generated FeynArts number *),
358   LaTeX->"u2.L",
359   Mass->LesHouches,
360   OutputName->"u2l" (* auto generated Output name *),
361   PDG->{53} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
362   Width->Automatic}},
363
364 {u3L,{
365   FeynArtsNr -> 24 (* auto generated FeynArts number *),
366   LaTeX->"u3.L",
367   Mass->LesHouches,
368   OutputName->"u3l" (* auto generated Output name *),
369   PDG->{55} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
370   Width->Automatic}},
371
372 {UL,{
373   FeynArtsNr -> 26 (* auto generated FeynArts number *),
374   LaTeX->"U.L",
375   Mass->LesHouches,
376   OutputName->"ul" (* auto generated Output name *),
377   PDG->{57} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
378   Width->Automatic}},
379
380 {uR,{
381   FeynArtsNr -> 28 (* auto generated FeynArts number *),
382   LaTeX->"u.R",
383   Mass->LesHouches,
384   OutputName->"ur" (* auto generated Output name *),
385   PDG -> {61, 62, 63} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
386   Width->Automatic}},
387
388 {utR,{
389   FeynArtsNr -> 30 (* auto generated FeynArts number *),
390   LaTeX->"U.R",
391   Mass->LesHouches,
392   OutputName->"utr" (* auto generated Output name *),
393   PDG->{65} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
394   Width->Automatic}},
395
396 {v0L,{
397   FeynArtsNr -> 32 (* auto generated FeynArts number *),
398   LaTeX->"\nu0.L",
399   Mass->LesHouches,
400   OutputName->"v0l" (* auto generated Output name *),
401   PDG -> {69, 70, 71} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
402   Width->Automatic}},
403
404 {VB,{
405   Description->"B-Boson",
406   FeynArtsNr -> 1,
407   LaTeX->"B",
408   Mass -> 0,
409   OutputName->"B",
410   PDG->{0},
411   Width->0}},
412
413 {VG,{
414   Description->"Gluon",
415   FeynArtsNr -> 5,
416   LaTeX->"g",
417   Mass -> 0,
418   OutputName->"g",
419   PDG->{21},
420   ElectricCharge -> 0,
421   Width->0}},
422

```

```

423 {VWB{
424   Description -> "W-Bosons",
425   FeynArtsNr -> 2,
426   LaTeX -> "W",
427   Mass -> 0,
428   OutputName -> "W",
429   PDG -> {0, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85} (* adjusted number of PDGs to number of generations *),
430   Width -> 0};
431
432
433
434 (* -----Additional particles in the model----- *)
435
436 {dt1L.{
437   FeynArtsNr -> 34 (* auto generated FeynArts number *),
438   LaTeX -> "dt1l" (* auto generated LaTeX name *),
439   Mass -> LesHouches,
440   OutputName -> "dt1l" (* auto generated Output name *),
441   PDG -> {87} (* auto generated PDGs *),
442   Width -> Automatic};
443
444 {dt2L.{
445   FeynArtsNr -> 36 (* auto generated FeynArts number *),
446   LaTeX -> "dt2l" (* auto generated LaTeX name *),
447   Mass -> LesHouches,
448   OutputName -> "dt2l" (* auto generated Output name *),
449   PDG -> {89} (* auto generated PDGs *),
450   Width -> Automatic};
451
452 {phi10.{
453   FeynArtsNr -> 38 (* auto generated FeynArts number *),
454   LaTeX -> "{\\phi}_{1}^0" (* auto generated LaTeX name *),
455   Mass -> LesHouches,
456   OutputName -> "phi10" (* auto generated Output name *),
457   PDG -> {91} (* auto generated PDGs *),
458   Width -> Automatic};
459
460 {phi10p.{
461   FeynArtsNr -> 40 (* auto generated FeynArts number *),
462   LaTeX -> "{\\phi}_{10p}" (* auto generated LaTeX name *),
463   Mass -> LesHouches,
464   OutputName -> "phi10p" (* auto generated Output name *),
465   PDG -> {93} (* auto generated PDGs *),
466   Width -> Automatic};
467
468 {phi1m.{
469   FeynArtsNr -> 42 (* auto generated FeynArts number *),
470   LaTeX -> "{\\phi}_{1m}" (* auto generated LaTeX name *),
471   Mass -> LesHouches,
472   OutputName -> "phi1m" (* auto generated Output name *),
473   PDG -> {95} (* auto generated PDGs *),
474   Width -> Automatic};
475
476 {phi20.{
477   FeynArtsNr -> 44 (* auto generated FeynArts number *),
478   LaTeX -> "{\\phi}_{2}^0" (* auto generated LaTeX name *),
479   Mass -> LesHouches,
480   OutputName -> "phi20" (* auto generated Output name *),
481   PDG -> {97} (* auto generated PDGs *),
482   Width -> Automatic};
483
484 {phi20p.{
485   FeynArtsNr -> 46 (* auto generated FeynArts number *),
486   LaTeX -> "{\\phi}_{20p}" (* auto generated LaTeX name *),
487   Mass -> LesHouches,
488   OutputName -> "phi20p" (* auto generated Output name *),
489   PDG -> {99} (* auto generated PDGs *),
490   Width -> Automatic};
491
492 {phi2m.{
493   FeynArtsNr -> 48 (* auto generated FeynArts number *),
494   LaTeX -> "{\\phi}_{2m}" (* auto generated LaTeX name *),
495   Mass -> LesHouches,
496   OutputName -> "phi2m" (* auto generated Output name *),
497   PDG -> {101} (* auto generated PDGs *),
498   Width -> Automatic};
499
500 {phi30.{
501   FeynArtsNr -> 50 (* auto generated FeynArts number *),
502   LaTeX -> "{\\phi}_{3}^0" (* auto generated LaTeX name *),
503   Mass -> LesHouches,
504   OutputName -> "phi30" (* auto generated Output name *),
505   PDG -> {103} (* auto generated PDGs *),
506   Width -> Automatic};
507
508 {phi3p.{
509   FeynArtsNr -> 52 (* auto generated FeynArts number *),
510   LaTeX -> "{\\phi}_{3p}" (* auto generated LaTeX name *),
511   Mass -> LesHouches,
512   OutputName -> "phi3p" (* auto generated Output name *),
513   PDG -> {105} (* auto generated PDGs *),
514   Width -> Automatic};
515
516 {phi3pp.{
517   FeynArtsNr -> 54 (* auto generated FeynArts number *),
518   LaTeX -> "{\\phi}_{3}^{++}" (* auto generated LaTeX name *),
519   Mass -> LesHouches,
520   OutputName -> "phi3pp" (* auto generated Output name *),
521   PDG -> {107} (* auto generated PDGs *),
522   Width -> Automatic};
523 };
524
525
526
527
528 (* ##### Weyl Spinors and intermediate states ##### *)
529
530 WeylFermionAndIntermediate = {
531
532 (* -----Already defined particles in existing particles.m----- *)
533

```

```

534 {d1L,{
535   LaTeX->"d^1.L"},
536
537 {u1L,{
538   LaTeX->"u^1.L"},
539
540 {d2L,{
541   LaTeX->"d^2.L"},
542
543 {u2L,{
544   LaTeX->"u^2.L"},
545
546 {d3L,{
547   LaTeX->"d^3.L"},
548
549 {u3L,{
550   LaTeX->"u^3.L"},
551
552 {UL,{
553   LaTeX->"U.L"},
554
555 {uR,{
556   LaTeX->"u.{R}"},
557
558 {uR,{
559   LaTeX->"U.R"},
560
561 {dR,{
562   LaTeX->"d.{R}"},
563
564 {dR,{
565   LaTeX->"D.{R}"},
566
567 {v0L,{
568   LaTeX->"\nu^0.L"},
569
570 {eR,{
571   LaTeX->"e.{R}"},
572
573 {FDL,{
574   LaTeX->"D.L"},
575
576 {FDR,{
577   LaTeX->"D.R"},
578
579 {FUL,{
580   LaTeX->"U.L"},
581
582 {FUR,{
583   LaTeX->"U.R"},
584
585 {FEL,{
586   LaTeX->"E.L"},
587
588 {FER,{
589   LaTeX->"E.R"},
590
591 {A1,{
592   Description->"CP-odd_state_1",
593   LaTeX->"A.1"},
594
595 {h1,{
596   Description->"CP-even_state_1",
597   LaTeX->"h.1"},
598
599 {A2,{
600   Description->"CP-odd_state_3",
601   LaTeX->"A.2"},
602
603 {h2,{
604   Description->"CP-even_state_3",
605   LaTeX->"h.2"},
606
607 {A3,{
608   Description->"CP-odd_state_4",
609   LaTeX->"A.3"},
610
611 {h3,{
612   Description->"CP-even_state_4",
613   LaTeX->"h.3"},
614
615 {phi1,{
616   Description->"Phi_1",
617   LaTeX->"\phi1.1"},
618
619 {phi2,{
620   Description->"Phi_2",
621   LaTeX->"\phi1.2"},
622
623 {phi3,{
624   Description->"Phi_3",
625   LaTeX->"\phi1.3"},
626
627 {Q1,{
628   Description->"Quark_triplet_1",
629   LaTeX->"Q.L^1"},
630
631 {Q2,{
632   Description->"Quark_triplet_2",
633   LaTeX->"Q.L^2"},
634
635 {Q3,{
636   Description->"Quark_triplet_3",
637   LaTeX->"Q.L^3"},
638
639
640 (* -----Additional particles in the model----- *)
641
642
643 {dt1L,{
644   LaTeX->"dt1L" (* auto generated LaTeX name *)},

```

```

645 {dt2L,{
646   LaTeX->"dt21" (* auto generated LaTeX name *)},
648 {eL,{
649   LaTeX->"e1" (* auto generated LaTeX name *)},
651 {d,{
652   LaTeX->"d" (* auto generated LaTeX name *)},
654 {dt,{
655   LaTeX->"dt" (* auto generated LaTeX name *)},
657 {e,{
658   LaTeX->"e" (* auto generated LaTeX name *)},
660 {1,{
661   LaTeX->"1" (* auto generated LaTeX name *)},
663 {u,{
664   LaTeX->"u" (* auto generated LaTeX name *)},
666 {ut,{
667   LaTeX->"ut" (* auto generated LaTeX name *)},
669 {VB,{
670   LaTeX->"B" (* auto generated LaTeX name *)},
672 {VG,{
673   LaTeX->"G" (* auto generated LaTeX name *)},
675 {VWB{
676   LaTeX->"WB" (* auto generated LaTeX name *)}
677 };
678

```

A.4 Archivo SPheno.m

```

1
2 OnlyLowEnergySPheno = True;
3
4 MINPAR={
5   {1,Lambda1IN},
6   {2,Lambda2IN},
7   {3,Lambda3IN},
8   {4,Lambda12IN},
9   {5,Lambda13IN},
10  {6,Lambda23IN},
11  {7,Lambda12TIN},
12  {8,Lambda13TIN},
13  {9,Lambda23TIN},
14  {10,fInput},
15  {11,VnIN},
16  {12,v1IN}
17 };
18
19 ParametersToSolveTadpoles = {mu12,mu22,mu32};
20
21 DEFINITION[MatchingConditions]= {
22   {v2,vSM},
23   {g1,g2SM/0.57},
24   {g2,g2SM},
25   {g3,g3SM},
26   {h111, YesM*vSM/v2}
27 };
28
29 BoundaryLowScaleInput={
30
31   {11,Lambda1IN},
32   {12,Lambda2IN},
33   {13,Lambda3IN},
34   {112,Lambda12IN},
35   {113,Lambda13IN},
36   {123,Lambda23IN},
37   {112t,Lambda12TIN},
38   {113t,Lambda13TIN},
39   {123t,Lambda23TIN},
40   {ftri,fInput},
41   {V,VnIN},
42   {v1,v1IN}
43 };
44
45
46 ListDecayParticles = {Fu,Fe,Fd,hh,Ah,Hpm,Dpm,VZ,VZp,VXp};
47 (*ListDecayParticles3B = {{Fu,"Fu.f90"},{Fe,"Fe.f90"},{Fd,"Fd.f90"}};*)
48
49 DefaultInputValues = {
50   Lambda1IN -> 0.1,
51   Lambda2IN -> 0.1,
52   Lambda3IN -> 0.1,
53   Lambda12IN -> 0.1,
54   Lambda13IN -> 0.1,
55   Lambda23IN -> 0.1,
56   Lambda12TIN -> 0.1,
57   Lambda13TIN -> 0.1,
58   Lambda23TIN -> 0.1,
59   fInput -> 2000,
60   TanBeta -> 10,
61   VnIN -> 5000,
62   v1IN -> 100
63 };
64
65 (* loop decays not supported for this model *)
66 SA`AddOneLoopDecay = False;

```

Agradecimientos

Agradecemos a Diego Restrepo de la Universidad de Antioquia por las útiles discusiones sobre SARAH. AT agradece el

soporte financiero de la Universidad de Medellín a través del proyecto 1042. RHB agradece al ‘Centro de Laboratorios de investigación, parque i-ITM’.

-
1. K. T. Mahanthappa and P. K. Mohapatra, *Phys. Rev.* **D42** (1990) 1732.
 2. R. Martinez and William A. Ponce and Luis A. Sanchez, *Phys. Rev.* **D65** (2002) 055013, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.65.055013>.
 3. Luis A. Sanchez and William A. Ponce and R. Martinez, *Phys. Rev.* **D64** (2001) 075013, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.075013>.
 4. H. Fanchiotti and C. Garcia-Canal and W. A. Ponce, *Europhys. Lett.* **72** (2005) 733-739, <https://doi.org/10.1209/epl/i2005-10313-x>.
 5. V. Pleitez and M. D. Tonasse, *Phys. Rev.* **D48** (1993) 2353-2355, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.48.2353>.
 6. William A. Ponce and Juan B. Florez and Luis A. Sanchez, *Int. J. Mod. Phys.* **A17**, (2002) 643-660, <https://doi.org/10.1142/S0217751X02005815>.
 7. F. Pisano and V. Pleitez, *Phys. Rev.* **D46** (1992) 410-417, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.46.410>.
 8. P. H. Frampton, *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 2889, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.2889>.
 9. Murat Ozer, *Phys. Rev.* **D54** (1996) 4561, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.54.4561>.
 10. R. D. Peccei and Helen R. Quinn, *Phys. Rev. Lett.* **38** (1977) 1440, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.1440>.
 11. Alex G. Dias and C. A. de S. Pires and P. S. Rodrigues da Silva, *Phys. Rev.* **D68** (2003) 115009, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.68.115009>.
 12. Paul H. Frampton, arXiv:hep-ph/9507351 (1995).
 13. Douglas Fregolente and Mauro D. Tonasse, *Phys. Lett.* **B555** (2003) 7, [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(03\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(03)00037-6).
 14. Hoang Ngoc Long and Nguyen Quynh Lan, *Europhys. Lett.* **64** (2003) 571, <https://doi.org/10.1209/epl/i2003-00267-5>.
 15. Simonetta Filippi and William A. Ponce and Luis A. Sanchez, *Europhys. Lett.* **73** (2006) 142, <https://doi.org/10.1209/epl/i2005-10349-x>.
 16. Yutaka Okamoto and Masaki Yasue, *Phys. Lett.* **B466** (1999) 267, [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(99\)01134-X](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)01134-X).
 17. Teruyuki Kitabayashi and Masaki Yasue, *Phys. Rev.* **D63** (2001) 095002, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.63.095002>.
 18. Darwin Chang and Hoang Ngoc Long, *Phys. Rev.* **D73** (2006) 053006, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.73.053006>.
 19. Aharon Davidson and Kameshwar C. Wali, *Phys. Rev. Lett.* **59** (1987) 393, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.393>.
 20. S. Rajpoot, *Phys. Rev.* **D36** (1987) 1479, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.36.1479>.
 21. Darwin Chang and Rabindra N. Mohapatra, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 1600, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1600>.
 22. D. A. Gutierrez and W. A. Ponce and L. A. Sánchez, *Int. J. Mod. Phys.* **A21** (2006) 2217, <https://doi.org/10.1142/S0217751X06029442>.
 23. Benavides, Richard H. and Giraldo, Yithsbey and Ponce, William A., *Phys. Rev.* **D80** (2009) 113009, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.113009>.
 24. F. Staub, arXiv:hep-ph/0806.0538 (2008).
 25. Vicente, Avelino, arXiv:hep-ph/1507.06349 (2015).
 26. Wolfram Research, Inc. Mathematica, Version 11.1, Campaign I, (2018).
 27. Werner Porod, *Comput. Phys. Commun.* **153** (2003) 275, [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(03\)00222-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(03)00222-4).
 28. Porod, W. and Staub, F., *Comput. Phys. Commun.* **183** (2012) 2458, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.05.021>.
 29. P.A. Zyla et al, to be published in *Prog. Theor. Exp. Phys.* **083C01** (2020), <http://pdg.lbl.gov>.