



UNIVERSIDAD DE SONORA

UNISON  
DIFUS

ACTIVITY REPORT THESIS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MASTER

PRESENTA:  
FRANCISCO MARTÍNEZ SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ALFREDO CASTAÑEDA



SONORA/HERMOSILLO

MES, AÑO

# **Activity report Thesis**

por

Francisco Martínez Sánchez

Bs. Physics

Tesis presentada para obtener el grado de

Master

en el

UNISON

UNIVERSIDAD DE SONORA

Sonora/Hermosillo. Mes, Año

# <sup>1</sup> Índice general

<b>2</b>	<b>1. Física de Partículas.</b>	<b>3</b>
3	1.1. El Universo y su evolución. . . . .	3
4	1.2. Modelo Estándar. . . . .	5
5	1.2.1. Composición de la Materia y Fuerzas Fundamentales . . . . .	6
6	1.2.2. Simetrías y Lagrangiano. . . . .	8
7	1.2.3. Insuficiencias del modelo. . . . .	10
8	1.3. Más allá del modelo estándar con la Materia Oscura. . . . .	11
9	1.3.1. Evidencias observacionales. . . . .	11
10	1.3.2. Composición de la Materia Oscura. . . . .	13
11	1.3.3. Partículas supersimetrías. . . . .	15
12	1.3.4. Extensión del Modelo Estándar con Supersimetría. . . . .	17
13	1.3.5. Modelo Dark-SUSY. . . . .	19
14	1.3.6. Formulación Teórica . . . . .	22
15	<b>2. Experimento y Simulación.</b>	<b>23</b>
16	2.1. Física de Altas Energías. . . . .	23
17	2.1.1. Actualizando HLC. . . . .	25
18	2.2. Experimento CMS. . . . .	27
19	2.2.1. Identificación y Reconstrucción de Muones. . . . .	29
20	2.3. Simulación en Altas Energías. . . . .	32
21	2.3.1. Implementando ROOT. . . . .	33
22	2.3.2. Altas Energías con MadGraph. . . . .	34
23	2.3.3. Hadronización con Pythia 8. . . . .	35
24	2.3.4. Simulando el detector con Delphes 3. . . . .	37
25	<b>3. Simulación y Análisis de Resultados.</b>	<b>39</b>
26	3.1. Herramientas de caracterización. . . . .	39
27	3.1.1. Generación de los datos. . . . .	40
28	3.1.2. Procesamiento y conversión de los datos. . . . .	44
29	3.1.3. Métodos de regresión de datos. . . . .	45
30	3.2. Análisis de eventos. . . . .	48
31	3.3. Generalidades de las propiedades independientes de los muones. . . . .	52

32	3.4. Reconstrucción de los fotones oscuros. . . . .	55
33	3.4.1. Reconstrucción de los eventos con 4 muones. . . . .	55
34	3.4.2. Reconstrucción de los eventos con menos de 4 muones. . . . .	55
35	3.4.3. Reconstrucción total de fotones oscuros. . . . .	55
36	3.5. Aislamiento. . . . .	55
37	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>67</b>

# <sup>38</sup> Índice de tablas

39	1-1. Ancho total y $f(m_{\gamma_D})$ . . . . .	20
40	3-1. Ejemplos de valores de frecuencia muónica para combinaciones de generación	51

# <sup>41</sup> Índice de figuras

42	1-1.	(a) Representación de la evolución del universo a lo largo de 13.77 mil 43 millones de años. Página de origen: <a href="https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html">https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/ 060915/index.html</a> . . . . .	4
44	1-2.	Clasificación de las partículas según el modelo estándar de las partículas 45 elementales. . . . .	7
46	1-3.	Diagrama de cúmulo de galaxias que actúa como lente gravitatoria para 47 una galaxia muy distante. Página de origen: <a href="https://alquimiayciencias.blogspot.com/2013/06/explicando-la-materia-oscura-cualquiera.html">https://alquimiayciencias.blogspot.com/2013/06/explicando-la-materia-oscura-cualquiera.html</a> . . . . .	12
48	1-4.	(a) Coalisión de dos cúmulos de galaxias 1E 0657-56 conocida como cúmulo 49 bala. , (b) Simulación por computadora de la futura colisión prevista de 50 las dos galaxias más grandes del Grupo Local, Andrómeda (M31) y la Vía 51 Láctea. . . . .	13
52	1-5.	Extensión del Modelo Estandar bajo la existencia de la supersimetría 53 ( <b>SUSY</b> ). . . . .	16
54	1-6.	Ilustración esquemática de la conexión entre el sector oscuro y el mode- 55 lo estandar, los cuales están conectados mediante un término de mezcla 56 dinámica. . . . .	21
57	1-7.	Flujo de positrones medido por el experimento AMS-02, comparado con los 58 experimentos PAMELA, Fermi-LAT, MASS, CAPIRCE, AMS-01 y HEAT. . . . .	22
59	2-1.	Diagrama de los experimentos que componen el centro de investigación del 60 <b>CERN</b> . . . . .	24
61	2-2.	Plan de actualización del experimento <b>LHC</b> . Pagina de origen: <a href="https://hilumilhc.web.cern.ch/content/h1-lhc-project">https://hilumilhc.web.cern.ch/content/h1-lhc-project</a> . . . . .	26
62	2-3.	Detector de solenoide de muón compacto. El detector consta de varias ca- 63 pas, cada una responsable de medir diferentes tipos de partículas. Pagina 64 de origen: <a href="http://ippog.web.cern.ch/resources/2011/cms-slice-july-2010-version">http://ippog.web.cern.ch/resources/2011/cms-slice-july-2010-version</a> . . . . .	27
65	2-4.	Probabilidad de localización de los muones en condiciones de Run-2 y HL. . . . .	30
66	2-5.	Resolución del momento de los muones en condiciones de Run-2 y HL. . . . .	30
67	2-6.	Eficiencia de reconstrucción de los muones en condiciones de Run-2 y HL. . . . .	32
68	2-7.	Perfil de diseño básico de la geometría del detector genérico asumido en 69 Delphes. Adaptado de artículo de origen Alwall <i>et al.</i> [2014]. . . . .	38
70			
71			
72			
73			

74	3-1. Secuencia lógica del análisis del proyecto. . . . .	39
75	3-2. Estructura del proyecto de generación. . . . .	41
76	3-3. Diagrama de flujo de programación del proyecto de generación. . . . .	43
77	3-4. Estructura del proyecto interpretador de la información contenida en los	
78	archivos <i>*.root</i> . Pagina del proyecto <a href="https://github.com/franky8939/DarkSUSY/blob/master/modules/darkSUSY/classDarkSUSY.py">https://github.com/franky8939/DarkSUSY/blob/master/modules/darkSUSY/classDarkSUSY.py</a> . . . . .	44
80	3-5. Estructura de los metadatos con la información filtrada. Pagina del proyec-	
81	to <a href="https://github.com/franky8939/DarkSUSY/blob/master/00-Convertidores/genera_h5.py">https://github.com/franky8939/DarkSUSY/blob/master/00-Convertidores/genera_h5.py</a> . . . . .	45
83	3-6. Diagrama de la estructura general de la red neuronal. . . . .	47
84	3-7. Distribuciones de frecuencia de las entradas $f^{(j, k)}$ ante cambios de TcPhoD,	
85	MPhoD y MNeuD. . . . .	49
86	3-8. Distribuciones de frecuencia de las entradas $f^{(j, k)}$ ante cambios de MNeuD. . . . .	51
87	3-9. Resultados de la regresión de los valores de frecuencia $f^{(4\mu, k)}$ . . . . .	52
88	3-10. Caracterización global de los momentos transversales de nuestra población	
89	de muones reconstruidos. . . . .	55
90	3-11. Grupo total de datos generados para los eventos de interes. . . . .	56
91	3-12. . . . .	56
92	3-13. Diagrama de flujo de programación para el análisis de los eventos con 3 y	
93	dos muones. . . . .	57
94	3-14. Análisis del porciento de reconstrucción de los fotones oscuros. . . . .	57

95  
96  
97

**Activity report Thesis**  
by  
Francisco Martínez Sánchez

98    **Abstract**

# <sup>99</sup> Introducción\*

100 En el núcleo del método científico se encuentra la interacción entre la teoría y el  
101 experimento: la formulación de una hipótesis y la prueba de dicha hipótesis a través  
102 de la experimentación, permitiendo que la física de altas energías se encuentre en una  
103 situación peculiar después del descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, el Modelo  
104 estándar de física de partículas se ha completado, pero a pesar de sus muchos éxitos, el  
105 Modelo Estándar no puede dar cuenta de muchos fenómenos que observamos, como la  
106 existencia de la materia oscura, la asimetría de materia-antimateria o el origen de las  
107 masas de neutrinos, entre otros. En las últimas décadas, se han propuesto muchas nuevas  
108 teorías para explicar estos fenómenos, pero a menudo solo se pueden probar utilizando los  
109 datos de los pocos experimentos del Gran Colisionador de Hadrones, ya que nos permiten  
110 recrear escenarios que de otra forma no podrían ser estudiados.

111 Probar una teoría implica una medición cuidadosa de las colisiones en un subconjunto  
112 particular de la población de datos. Los equipos de análisis deben calcular con precisión  
113 cuántos eventos se esperarían de los procesos del Modelo Estándar en ese subconjunto y,  
114 de manera similar, cuántos eventos cabría esperar de la teoría particular de la nueva física  
115 en la que uno está interesado. Con estos cálculos en mano, los analistas pueden mirar los  
116 datos reales observados y realizar un análisis estadístico que indicara si la teoría particular  
117 es favorecida por los datos, normalmente dicho análisis se define mediante un complejo  
118 análisis basada en software. La mayor parte del trabajo en el desarrollo de un teoría  
119 consiste en crear un respaldo en datos que contiene la mayor cantidad de información  
120 sobre la teoría estudiada, así como también en hacer los cálculos precisos del Modelo  
121 Estándar.

122 La simulación de los distintos procesos físicos en el **LHC** y la respuesta del detector  
123 a los mismos es necesaria para poder optimizar y estimar el desempeño de los diferentes  
124 análisis. Además, permite que las estrategias utilizadas en la identificación de partículas  
125 puedan ser desarrolladas con anterioridad a la toma de datos y las eficiencias de los al-  
126 goritmos pueden ser puestos a prueba. La preparación de las búsquedas de nueva física  
127 necesitan una simulación detallada del detector para estimar su potencial de descubri-  
128 miento y para desarrollar métodos óptimos para medir las propiedades de las partículas.

129 Es fundamental un correcto entendimiento de los procesos de señal y de fondo para  
130 poder distinguir entre ambos. Una vez que los datos de colisiones reales están disponibles,  
131 los simulados resultan necesarios para poder encontrar desviaciones del **SM**. La estructura  
132 de los eventos de colisiones de altas energías son realmente complejos y no predecibles

<sup>133</sup> de primeros principios. Los generadores de eventos permiten separar el problema en varios  
<sup>134</sup> pasos más simples, algunos de los cuales pueden ser descriptos por primeros principios, y  
<sup>135</sup> otros necesitan ser basados en modelos apropiados con parámetros ajustados a los datos.  
<sup>136</sup> Un aspecto central de los generadores es que proveen una descripción del estado final para  
<sup>137</sup> poder construir cualquier observable y compararlos con los datos de colisiones reales.

---

“No hay nada que hagan los seres vivos que no pueda entenderse desde el punto de vista de que están hechos de átomos que actúan de acuerdo con las leyes de la física.”

*Richard P. Feynman*

# <sup>138</sup> Capítulo 1

## <sup>139</sup> Física de Partículas.

<sup>140</sup> Encontrar los fundamentos del funcionamiento de los objetos materiales que componen la naturaleza ha sido una de las tareas de la que se ha ocupado la humanidad desde <sup>141</sup> tiempos inmemorables, esta cuestión se abrió paso dentro de la química del siglo XIX comenzando con la existencia del átomo con Dalton (1803) y pasó a ser parte de la física con <sup>143</sup> el descubrimiento del electrón por Thomson (1906) (teorizado por G. Johnstone Stoney (1881)) y de la radioactividad por el físico francés Antoine Henri Becquerel (1896).

<sup>144</sup> Para los inicios del siglo XX es cuando el área de Física de Partículas Elementales se forma como área independiente junto con el establecimiento de la composición del núcleo atómico y con el advenimiento de los aceleradores, la misma se establece como la ciencia <sup>148</sup> que estudia los componentes elementales de la materia y las interacciones entre ellos, <sup>149</sup> también se la conoce como física de altas energías, con la cual se intenta teorizar sobre <sup>150</sup> los orígenes del comportamiento del universo.

### <sup>152</sup> 1.1. El Universo y su evolución.

<sup>153</sup> El modelo estándar caliente del Big Bang teoriza que las condiciones iniciales para <sup>154</sup> el Universo sean dadas por campo gaussiano casi invariante o espectro de Harrison– <sup>155</sup> Zeldovich [Rubakov, 2009], predicción del modelo de inflación cósmica. Por lo que si se <sup>156</sup> considera el estado inicial del Universo aleatorio bajo ciertas consideraciones, entonces, <sup>157</sup> los postulados sobre las inhomogeneidades en el Universo necesitan ser estadísticas por <sup>158</sup> naturaleza.

<sup>159</sup> En la actualidad la radiación del fondo cósmico de microondas (**CMB**, de sus siglas <sup>160</sup> en inglés **Cosmic Microwave Background**) descubierto a mediados de los años 1960 y <sup>161</sup> el corrimiento al rojo cosmológico son conjuntamente evidencia experimental disponible <sup>162</sup> para validar aspectos importantes de la teoría del Big Bang. Según se expande el Universo, <sup>163</sup> los fotones del fondo cósmico de microondas se desplazan hacia el rojo, haciendo que la <sup>164</sup> temperatura de radiación sea inversamente proporcional al factor de escala del Universo.

<sup>165</sup> La radiación **CMB** parece a primera vista isótropa, posee pequeñas variaciones en <sup>166</sup> la temperatura predichas por el modelo de Big Bang, estas pequeñas anisotropías o

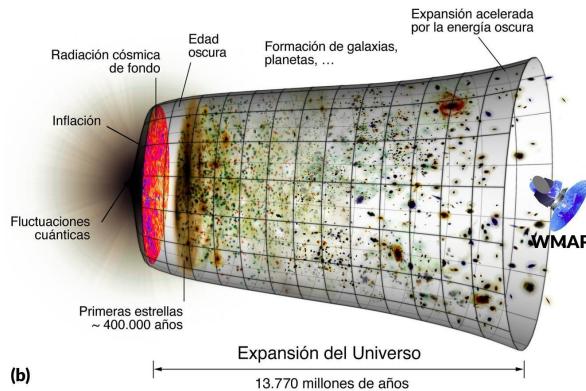


Figura 1-1: (a) Representación de la evolución del universo a lo largo de 13.77 mil millones de años. Página de origen: <https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>

167 inhomogeneidades teorizadas fueron detectadas finalmente en los años 90 por el satélite  
 168 de la NASA **COBE** (Cosmic Background Explorer) entre 1989 y 1996, considerandose  
 169 variaciones de densidad del universo primitivo y su descubrimiento arroja indicios de la  
 170 formación de las primeras estructuras de gran escala y la distribución de galaxias del  
 171 universo actual.

172 En el 2001 la agencia espacial americana NASA lanza el **WMAP** ( de sus siglas  
 173 en inglés Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)<sup>1</sup> satélite capaz de estudiar con gran  
 174 detalle la radiación **CMB** consiguiendo el mapa más completo posible por la humanidad.  
 175 El 2009 la Agencia Espacial Europea lanzó el Planck, un satélite de capacidades mucho  
 176 mayores todavía que el **WMAP**.

177 La imagen detallada de la temperatura de la radiación de fondo cósmico de micro-  
 178 ondas (**CMB**, de sus siglas en inglés Cosmic Microwave Background) de todo el cielo  
 179 del universo fue recreada a partir diversos intento de medición y con la red de datos  
 180 del **WMAP**.

181 las especies ya mencionadas estuvieron térmicamente acopladas en el gas primigenio.  
 182 Conforme el Universo se expande, su temperatura disminuye y las diversas especies se  
 183 desacoplan del gas, dando lugar a épocas con propiedades muy particulares (Fig. ??)..

184 .  
 185 El satélite artificial Planck como parte del programa científico Horizon 2000 de la  
 186 Agencia Espacial Europea es lanzado en el 2009 con la intención de detectar las aniso-  
 187 tropías en el fondo cósmico de microondas en casi todo el cielo, con una resolución y  
 188 sensibilidad sin precedentes.

189 En general, la información extraída del nuevo mapa de Planck proporciona una exce-  
 190 lente confirmación del modelo estándar de cosmología con una precisión sin precedentes,  
 191 estableciendo un nuevo punto de referencia en nuestro manifiesto de los contenidos del  
 192 Universo y debido a que la precisión del mapa de Planck es tan alta, también permitió

---

<sup>1</sup> Página de origen: <https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>

<sup>193</sup> revelar algunas características peculiares inexplicables que pueden requerir una nueva  
<sup>194</sup> física para ser entendidas.

<sup>195</sup> Entre los hallazgos más sorprendentes están:

- <sup>196</sup> - Las fluctuaciones en las temperaturas de **CMB** a grandes escalas angulares no  
<sup>197</sup> coinciden con las predichas por el modelo estándar; sus señales no son tan fuertes  
<sup>198</sup> como se esperaba de la estructura a menor escala revelada por Planck.
- <sup>199</sup> - Se reafirma la asimetría en las temperaturas medias en hemisferios opuestos del  
<sup>200</sup> cielo. Esto va en contra de la predicción hecha por el modelo estándar de que el  
<sup>201</sup> Universo debería ser ampliamente similar en cualquier dirección que miremos.
- <sup>202</sup> - Se reafirma la existencia de un punto frío se extiende sobre un parche de cielo que  
<sup>203</sup> es mucho más grande de lo esperado.

<sup>204</sup> Estos últimos dos puntos ya se habían intuido con la misión **WMAP** de la NASA, pero  
<sup>205</sup> fueron ignorados en gran medida debido a las dudas persistentes sobre su origen cósmico  
<sup>206</sup> [Collaboration, 2019].

<sup>207</sup> Una forma de explicar las anomalías es proponer que el Universo, de hecho, no es el  
<sup>208</sup> mismo en todas las direcciones en una escala mayor de lo que podemos observar. En este  
<sup>209</sup> escenario, los rayos de luz del CMB pueden haber tomado una ruta más complicada a  
<sup>210</sup> través del Universo de lo que se entendía anteriormente, lo que resulta en algunos de los  
<sup>211</sup> patrones inusuales observados hoy, sin embargo, sin la consideración de las anomalías,  
<sup>212</sup> los datos de Planck se ajustan espectacularmente bien a las expectativas de un modelo  
<sup>213</sup> bastante simple del Universo.

<sup>214</sup> Esto permitió obtener valores mas refinados de los obtenidos por el **WMAP** de la  
<sup>215</sup> composición de la materia que compone el universo, sus resultados fueron 4.9% de la  
<sup>216</sup> masa bariónica. La materia oscura, que hasta ahora solo se ha detectado indirectamente  
<sup>217</sup> por su influencia gravitacional, representa el 26.8% y la energía oscura con un porcentaje  
<sup>218</sup> de 68.3% siendo la fuerza misteriosa posible responsable de acelerar la expansión del  
<sup>219</sup> Universo.

<sup>220</sup> Los datos de Planck establecen la velocidad a la que el Universo se está expandiendo  
<sup>221</sup> hoy(constante de Hubble) con  $H_0 = 67.15 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  implicando que la edad del  
<sup>222</sup> Universo teorizada en la Fig. 1-1b.

## <sup>223</sup> 1.2. Modelo Estándar.

<sup>224</sup> El modelo estándar (**ME**) es el formalismo teórico-experimental que hasta el día de  
<sup>225</sup> hoy describe con mayor precisión las interacciones entre las partículas elementales y los  
<sup>226</sup> diferentes tipos de fuerzas que experimentan las mismas. Los mayores desarrollos teóricos  
<sup>227</sup> y descubrimientos experimentales que dieron forma al modelo estándar se tuvieron en  
<sup>228</sup> la segunda mitad del siglo XX con el desarrollo de la Teoría Cuántica de Campo, fruto  
<sup>229</sup> del esfuerzo de científicos de todo el mundo, los cuales a partir de los modelos teóricos  
<sup>230</sup> y observaciones experimentales construyeron una clasificación de las partículas en base

231 a sus propiedades fundamentales como lo son la masa, la carga eléctrica, el espín, entre  
232 otras. Dicha clasificación se muestra en la Figura 1-2.

233 En el mundo atómico y subatómico se tratan los problemas con la mecánica cuántica  
234 y unido a esto las magnitudes de las energías que se manejan para escudriñar el mundo  
235 subnuclear requiere del uso de la mecánica relativista superior en complejidad a la mecá-  
236 nica newtoniana, entonces la formulación conjunta de la mecánica cuántica y la mecánica  
237 relativista se expresa adecuadamente en el lenguaje de la Teoría Cuántica del Campo,  
238 que es capaz de describir la aniquilación, creación, decaimientos e interacciones de las  
239 partículas elementales, así teorías sobre física de las partículas elementales se describen  
240 con el lenguaje de teoría cuántica del campo.

### 241 1.2.1. Composición de la Materia y Fuerzas Fundamentales

242 El Modelo Estándar (**SM**) describe la composición del universo usando 6 quarks, 6  
243 leptones y algunas partículas portadoras de las cuatro fuerzas (o interacciones) conocidas,  
244 cada una mediada por una partícula fundamental, ellas son los fotones  $\gamma$  (interacción elec-  
245 tromagnética), los higgs **H** (interacción gravitatoria), los gluones **g** (interacción fuerte)  
246 y las partículas **W** y **Z** (fuerza débil). Actualmente la Gravedad está incluida solamente  
247 en el Modelo Estándar como hipótesis especulativa.

248 Las partículas elementales están divididas en dos categorías según el valor de su espín  
249 en fermiones (espín semi-entero, para elementales  $1/2$ ) y bosones (espín entero, para  
250 elementales  $1$  menos el higgs con  $0$ ), estos obedecen también a la estadística de Fermi-  
251 Dirac y la estadística de Bose-Einstein, respectivamente, solo cumpliendo el principio de  
252 exclusión de Pauli los primeros.

253 Como se observa en la Fig. 1-2 los fermiones están a la vez divididos en dos subgrupos  
254 importantes (quarks y leptones), estos con claras diferencias palmeables:

- 255 - **Carga** : los leptones poseen carga eléctrica neutra (los neutralinos) o una carga  
256 fundamental unidad (electrón, muón y tau), los quarks, por otra parte, disponen  
257 de cargas fraccionadas ( $-1/3$  o  $+2/3$ ).
- 258 - **Fuerzas** : la fuerza fuerte mediada por sus partículas portadoras los gluones **g**  
259 mantiene unido los núcleos atómicos y solo actúa sobre los quarks razón por la  
260 cual no existirán nunca libremente en la naturaleza, esta fuerza además aumenta a  
261 medida que se mueven los quarks entre sí, asegurando que un quark libre nunca se  
262 detecte.

### 263 Los Quark

264 El campo de estudio dedicado a las interacciones entre quarks y gluones se llama  
265 Cromodinámica Cuántica (**QCD**), en concreto explica la interacción entre los quarks  
266 mediante el intercambio de gluones que son los portadores de un nuevo número cuántico  
267 (el color el cual fue introducido por Greenberg en 1964 para restaurar el principio de  
268 Pauli) para formar todas las partículas que interaccionan fuertemente (hadrones), ya sean  
269 mesones donde interaccionan quark y antiquark,  $q\bar{q}$ , o báriones donde interaccionan tres

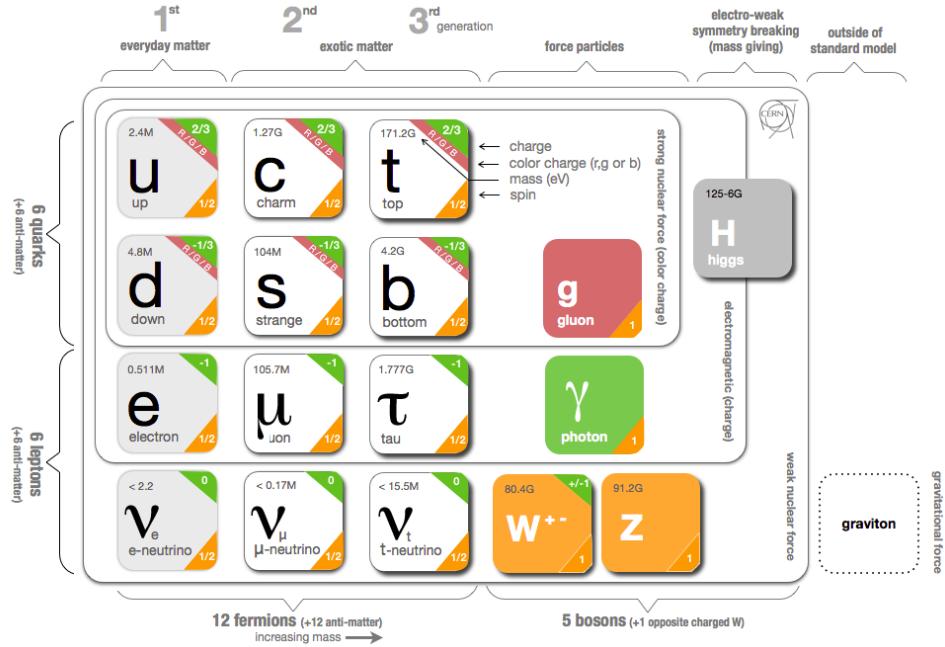


Figura 1-2: Clasificación de las partículas según el modelo estándar de las partículas elementales.

270 quarks de diferente color, **qqq** dado que los quarks son partículas de espín semi-entero,  
271 dos quarks del mismo tipo no podían tener los mismos números cuánticos.

## 272 Los leptones

273 Los leptones forman parte de la familia de los fermiones por lo cual poseen espín semi-  
274 entero, además no poseen carga hadrónica o de color y por lo tanto tampoco experimentan  
275 la interacción nuclear fuerte. Se han identificado tres sabores característicos, el electrón  
276 ( $e$ ), el muón ( $\mu$ ) y el tauón ( $\tau$ ), respectivamente representado por un par de partículas  
277 llamadas doblete débil, una tiene carga masiva que lleva el mismo nombre que su sabor  
278 y la otra es una partícula neutra casi sin masa llamada neutrino.

- 279 - **El electrón :** es una partícula elemental perteneciente a la primera generación de  
280 los leptones, representada por el símbolo  $e^-$  posee una carga eléctrica elemental  
281 negativa. Su antipartícula es denominada positrón idéntica excepto por la carga de  
282 signo opuesto.
- 283 - **El muón :** es una partícula elemental masiva perteneciente a la segunda generación  
284 de leptones, representada por el símbolo  $\mu^-$  su masa es 100 veces mayor que la del  
285 electrón. Su correspondiente antipartícula es el antimuón ( $\mu^+$ ).
- 286 - **El tau :** llamada a veces tauón, es una partícula elemental masiva que pertenece  
287 a la tercera generación de leptones, representada por el símbolo  $\tau^-$ , su masa es

288 cerca de 3500 veces mayor que la del electrón. Su correspondiente antipartícula es  
289 el antitau o antitauón ( $\tau^+$ ).

- 290 - **Los neutrinos** : son partículas subatómicas sin carga y de espín 1/2, que estas  
291 partículas tienen masa muy pequeña, su interacción con las demás partículas es  
292 mínima, por lo que pasan a través de la materia ordinaria sin apenas perturbarla.  
293 Existen tres tipos de neutrinos asociados a cada una de las familias leptónicas (o  
294 sabores): neutrino electrónico ( $v_e$ ), neutrino muónico ( $v_\mu$ ) y neutrino tauónico ( $v_\tau$ )  
295 más sus respectivas antipartículas.

296 Cada partícula anteriormente descrita con su correspondiente anti-partícula corres-  
297 ponde con la materia bariónica.

### 298 1.2.2. Simetrías y Lagrangiano.

299 Dada la existencia de disímiles partículas, elementales y compuestas, sugirió la ne-  
300 cesidad de hacer uso de simetrías para entender las relaciones entre ellas, estás existen  
301 cuando la expresión matemática de las leyes de la física es independiente (invariante)  
302 del sistema de referencia, estas simetrías son internas ya que relacionan partículas entre  
303 sí. La búsqueda de la simetría responsable de las similitudes entre los hadrones condujo  
304 a la formulación de la teoría de quarks, como base del espacio donde opera el grupo  
305 clasificador de hadrones **SU(3)**. Aparte de los grupos de clasificación hay grupos que  
306 corresponden a *simetrías espontáneamente rotas*.

307 El papel de las simetrías en la física de partículas elementales subió a un rango su-  
308 perior en la década de los cincuenta cuando se les identificó como determinantes de la  
309 dinámica al postularse como simetrías locales, es decir cuando se exige que las trans-  
310 formaciones que forman el grupo correspondiente varíen de punto a punto en el espacio  
311 cuatridimensional cotidiano. A estas simetrías se les denomina simetrías de norma y para  
312 que sean exactas se requiere la existencia de campos que representan las fuerzas (las par-  
313 tículas cuyo intercambio entre las partículas ordinarias son la causa de las interacciones  
314 conocidas o de nuevas interacciones). Así la interacción electromagnética es consecuen-  
315 cia ineludible de la simetría de norma asociada al grupo **U(1)**, las interacciones débiles  
316 junto con las electromagnéticas resultan de la simetría de norma **SU(2)  $\otimes$  U(1)**, y las  
317 interacciones entre quarks de una simetría de norma **SU(3)<sub>c</sub>** que opera en el espacio  
318 tridimensional de color.

319 Sin embargo las partículas responsables de interacciones deben ser de masa cero,  
320 como lo es el fotón, si las simetrías de norma son exactas y explícitas. Esta última  
321 cualidad es opuesta a la de ser espontáneamente rota. Siendo un hecho experimental  
322 el que las interacciones débiles (responsables de la radioactividad) son de muy corto  
323 alcance, deben ser entonces los mediadores de esta interacción de masa muy grande.  
324 Esto solo se concibe si la simetría de norma correspondiente a esta interacción está  
325 espontáneamente rota. Para que este fenómeno acontezca es necesario un ingrediente  
326 adicional en el modelo o cuadro completo., este es el bosón de Higgs. El **SM** consiste  
327 entonces en un contenido de materia, los quarks y los leptones en tres familias, con una

328 dinámica dictada por la simetría de norma  $\mathbf{U(1)} \otimes \mathbf{SU(2)} \otimes \mathbf{SU(3)_c}$  y con un elemento  
 329 adicional, el Higgs, responsable de la rotura (parcial) espontánea de  $\mathbf{U(1)} \otimes \mathbf{SU(2)}$ . El  
 330 lagrangiano del modelo estandar que describe estas interacciones es:

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Fermion} + \mathcal{L}_{Higgs} + \mathcal{L}_{Yukawa} + \mathcal{L}_{GF} + \mathcal{L}_{Ghost} \quad (1-1)$$

331 donde tenemos que:

332 -  $\mathcal{L}_{gauge}$  : resultado de la teoría de campo de calibración, esta resume la interacción  
 333 entre fermiones como resultado de la introducción de transformaciones pertenecientes  
 334 al grupo de simetría interna. El lagrangiano de gauge describe la dinámica de los  
 335 campos fermiónicos poseyendo alguna simetría interna “local” dada por un grupo  
 336 de Lie, llamado grupo de transformaciones de gauge, transformando algún grado  
 337 de libertad que no modifica ninguna propiedad física observable. Una manera de  
 338 representar su ecuación matemática viene dada por:

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \quad (1-2)$$

339 El desarrollo de los términos de los campos de fuerza pueden encontrarse en la  
 340 referencia [Romao y Silva, 2012].

341 -  $\mathcal{L}_{Fermion}$  : los términos cinéticos para los fermiones, incluyendo la interacción con  
 342 el gauge de campo debido a sus derivadas covariantes, tiene su forma:

$$\mathcal{L}_{Fermion} = \sum_{quarks} i\bar{q}\gamma^\mu D_\mu q + \sum_{\psi_L} i\bar{\psi}_L \gamma^\mu D_\mu \psi_L + \sum_{\psi_R} i\psi_R \gamma^\mu D_\mu \psi_R \quad (1-3)$$

343 -  $\mathcal{L}_{Higgs}$  : El mecanismo de Higgs es el proceso que da masa a las partículas elemen-  
 344 tales, en una teoría de gauge el mecanismo de Higgs dota con masa a los bosones  
 345 de gauge a través de la absorción de los bosones de Nambu–Goldstone derivados de  
 346 la ruptura espontánea de simetría. El sistema viene descrito por un Lagrangiano  
 347 con la forma:

$$\mathcal{L}_{Higgs} = (D_\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda(\Phi^\dagger \Phi)^2 = (D_\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi - V(\Phi) \quad (1-4)$$

348 donde  $V(\Phi) \equiv \lambda(\Phi^\dagger \Phi)^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi$  conocido como el potencial renormalizable

349 -  $\mathcal{L}_{Yukawa}$  : mecanismo que describe la interacción entre un campo escalar y un campo  
 350 de Dirac mediante una constante de acoplamiento. La forma matemática de su  
 351 lagrangiano es:

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = -\overline{L}_L Y_L \Phi \ell_R - \overline{Q}'_L Y_d \Phi d'_R - \overline{Q}'_L Y_u \Phi u'_R + h.c \quad (1-5)$$

352 El desarrollo de esta ecuación, explicación de la notación en la referencia [Santa-  
 353 maria, 1993; Romao y Silva, 2012]

354 -  $\mathcal{L}_{GF}$  : en la teoría de los *gauges*, se realiza continuamente una elección constante,  
355 siendo este un procedimiento matemático para hacer frente a grados de libertad  
356 redundantes en las variables de campo. La mayoría de las predicciones físicas cuan-  
357 titativas de una teoría de *gauges* solo pueden obtenerse bajo una receta coherente  
358 para suprimir o ignorar estos grados de libertad no físicos.

359 -  $\mathcal{L}_{Ghost}$  : para una condición de fijación del medidor lineal, es un campo adicional  
360 que se introduce en las teorías cuánticas de campos de tipo *gauge* para mantener  
361 la consistencia de la formulación de integral

362 El modelo estándar está respaldado por una serie de observaciones experimentales, la  
363 más reciente fue la observación de una nueva partícula cuyas propiedades son consistentes  
364 con el bosón de Higgs, sin embargo, aún existen fenómenos en la naturaleza que no pueden  
365 ser explicados dentro del formalismo del modelo estándar.

### 366 1.2.3. Insuficiencias del modelo.

367 Incluso cuando el **SM** ha tenido gran éxito en explicar los resultados experimentales,  
368 tiene ciertas cuestiones importantes sin resolver:

- 369 - **Gravedad** : no hay una explicación fundamental para la gravedad, hay incompa-  
370 tibilidades con la relatividad general.
- 371 - **Materia oscura y energía oscura** : como se pudo constatar anteriormente, solo  
372 es posible explicar el 4.9 % de la energía presente en el universo. El 26.8 % de la  
373 materia del universo apenas interactúa con los campos del Modelo Estándar. Los  
374 intentos de explicar la energía oscura en términos de la energía del vacío del Modelo  
375 Estándar llevan a un error de 120 órdenes de magnitud.
- 376 - **Masa de los neutrinos** : el **SM** considera a los neutrinos partículas sin masa,  
377 cuestión refutada por los experimentos de las oscilaciones de neutrinos.
- 378 - **Asimetría de la materia–antimateria** : el **SM** predice que la materia y la  
379 antimateria deben haber sido creadas en cantidades estadísticamente semejantes,  
380 cuestión que si fuera real hubiera aniquilado unas a otras durante el enfriamiento  
381 del universo.
- 382 - **Problema de jerarquía** : teóricamente se introduce partículas con masas a  
383 través de un proceso de ruptura espontánea de simetría electrodébil provocado por  
384 el campo de Higgs. Dentro del modelo estándar, la masa de Higgs obtiene algunas  
385 correcciones cuánticas muy grandes debido a la presencia de partículas virtuales.  
386 Estas correcciones son mucho más grandes que la masa de Higgs real, consideración  
387 no natural por muchos físicos teóricos.
- 388 - **Problema CP fuerte** : teóricamente se puede argumentar que el modelo estándar  
389 debe contener un término que rompa la simetría **CP** (relacionando la materia con  
390 la antimateria), pero este no se ha encontrado.

391 **1.3. Más allá del modelo estándar con la Materia  
392 Oscura.**

393 Detrás de la materia oscura y la energía oscura, el término oscuro hace referencia al  
394 desconocimiento sobre cualquiera de las dos, específicamente del tipo de partículas que las  
395 componen. Solo sabemos que no están compuestas de protones, neutrones, electrones o  
396 neutrinos. Además, ni la materia oscura ni la energía oscura sienten las fuerzas eléctricas  
397 y magnéticas y por tanto no interactúan con la luz, no la emiten ni la absorben. Son  
398 inmunes a las ondas electromagnéticas en todas las frecuencias, desde el radio, pasando  
399 por la luz visible hasta los rayos gamma, de forma rigurosa el calificativo oscuras no  
400 aplica, son transparentes, su existencia es supuesta porque la gravitación es universal  
401 y todo lo que tenga masa-energía crea gravedad.

402 **1.3.1. Evidencias observacionales.**

403 Ambas, materia oscura y energía oscura se detectan por sus efectos gravitacionales  
404 ya que una partícula de materia oscura aún no ha sido identificada, sin embargo, los  
405 nuevos experimentos y desarrollos tecnológicos han permitido alcanzar una sensibilidad  
406 tal que hace pensar en un descubrimiento inminente. A continuación expondremos algunas  
407 investigaciones que involucran a tales partículas que se realizan tanto en el espacio  
408 exterior, como en los laboratorios en la tierra.

409 **Rotación de las galaxias**

410 En la primera mitad del siglo pasado Paul Zwicky había estado observado agrupaciones  
411 de galaxias ligadas por atracción gravitatoria, siendo el primero en utilizar el  
412 Teorema de virial, del estudio de las velocidades radiales de ocho galaxias en el cúmulo  
413 Coma, Zwicky encontró una dispersión de velocidad inesperadamente grande  $\sigma_{cz} =$   
414  $(1019 \pm 360) \text{ km s}^{-1}$  (recalculado en la actualidad por valor moderno  $\sigma_{cz} = 1082 \text{ km s}^{-1}$   
415 obtenido por Colless y Dunn [1996]). Zwicky concluyó de estas observaciones que la densidad  
416 media del grupo Coma tendría que ser  $\sim 400$  (valor moderno recalculado de  $\sim 50$ )  
417 veces mayor que la derivada de la materia luminosa (se sobreestimó la relación masa-luz  
418 del grupo Coma por asumir un parámetro de Hubble de  $H_o = 558 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  cuando  
419 su valor moderno de  $H_o = 67.15 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Zwicky postula:

420 *“Si se confirma esta sobredensidad, llegaríamos a la sorprendente conclusión de que la materia oscura está presente en Coma con una densidad mucho mayor que la materia luminosa ... De estas consideraciones se deduce que la gran dispersión de velocidad en Coma representa un problema no resuelto”*

presente en la referencia Bergh [1999]

421 En la actualidad se continúan los intentos por comprender el problema galáctico de la  
422 masa visible faltante, ejemplos se pueden encontrar proyectos de simulaciones [Deur, 2020;

423 Wu y Kroupa, 2015] o mediante la comparación empírica con los datos experimentales  
424 Mielke *et al.* [2006], con altos niveles de predicción.

#### 425 Lentes gravitacionales

426 Otra evidencia viene de las lentes gravitacionales (Fig. 1-3). La gravedad afecta a  
427 todo el espectro de ondas electromagnéticas, incluyendo radio, infrarrojos, luz visible  
428 y ultravioleta, siendo el grado de desviación mayor mientras mayor sea la masa que  
429 actúa como lente gravitacional, siendo esta predicción uno de los mayores resultados de  
430 Einstein, en estos cálculos se pudo evidenciar el efecto para calcular el valor de masas de  
431 grandes cúmulos midiendo las desviaciones de la luz.

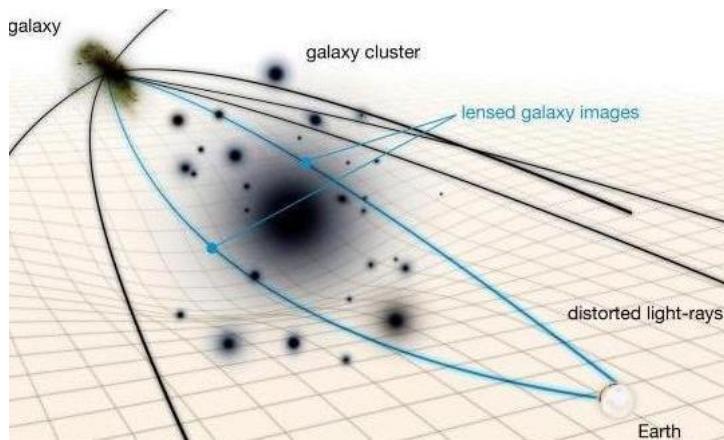


Figura 1-3: Diagrama de cúmulo de galaxias que actúa como lente gravitatoria para una galaxia muy distante. Página de origen: <https://alquimiayciencias.blogspot.com/2013/06/explicando-la-materia-oscura-cualquiera.html>

432 Dadas sus características los lentes gravitacionales son un importante herramienta  
433 para detectar la materia oscura, resultado de la comparación de los resultados experimen-  
434 tales con los resultados de la relatividad general que predice la dinámica dependiente de  
435 la masa visible.

#### 436 Coalisión de galaxias

437 Los científicos usaron el observatorio Chandra de rayos X de la NASA y el Telescopio  
438 Espacial Hubble para estudiar el grupo, conocido como MACSJ0025.4-1222, donde se  
439 enfoca una colisión de dos cúmulos de galaxias (ver Fig. 1-4a).

440 En el proceso de la colisión, la temperatura de la materia normal aumenta y se emiten  
441 rayos X que fueron detectados por el Observatorio de Rayos X Chandra. Las áreas azules  
442 son un mapa de la materia invisible hecha mediante el uso de lentes gravitacionales,  
443 donde la luz de los objetos más distantes que el grupo de bolas se dobla por la materia  
444 que interviene. La materia normal que se muestra en rosa está claramente separada de la  
445 mayoría de la materia que comprende los grupos que se muestran en azul. La conclusión

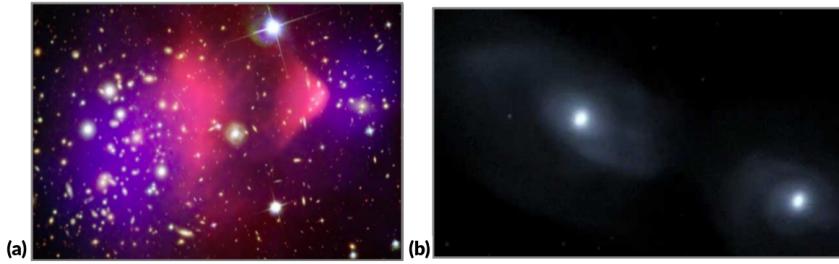


Figura 1-4: (a) Coalisión de dos cúmulos de galaxias 1E 0657-56 conocida como cúmulo bala. , (b) Simulación por computadora de la futura colisión prevista de las dos galaxias más grandes del Grupo Local, Andrómeda (M31) y la Vía Láctea.

<sup>446</sup> es que la mayor parte de la materia en los grupos es materia oscuraMarsh [2019].

#### <sup>447</sup> **Formación de estructuras**

<sup>448</sup> La historia del universo es la competencia entre la materia oscura que lo frena y la  
<sup>449</sup> energía oscura que lo acelera. A medida que el espacio se expande, la materia y la radia-  
<sup>450</sup> ción se diluyen; en cambio, la densidad del vacío permanece constante, y por eso triunfará  
<sup>451</sup> en la competencia, el universo se expandirá cada vez a un ritmo mayor y esa aceleración  
<sup>452</sup> tiene importantísimas consecuencias para el futuro del universo, de aquí que sea crucial  
<sup>453</sup> para el modelo cosmológico del Big Bang como un componente que se corresponde di-  
<sup>454</sup> rectamente con las medidas de los parámetros asociados con la métrica **FLRW** (métrica  
<sup>455</sup> de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker) a la relatividad general.

<sup>456</sup> Según se unen las estructuras en la evolución del Universo, empiezan a "brillarza que  
<sup>457</sup> la materia bariónica se calienta a través de la contracción gravitacional y los objetos se  
<sup>458</sup> aproximan al equilibrio hidrostático. La materia barionica ordinaria tendría una tempe-  
<sup>459</sup> ratura demasiado alta y demasiada presión liberada desde el Big Bang para colapsar y  
<sup>460</sup> formar estructuras más pequeñas, como estrellas, a través de la inestabilidad de Jeans.  
<sup>461</sup> La materia oscura actúa como un compactador de estructuras.

#### <sup>462</sup> **1.3.2. Composición de la Materia Oscura.**

<sup>463</sup> La existencia de la materia oscura es importante en la comprensión del modelo de  
<sup>464</sup> formación del universo teorizado por el Big Bang y del modo de comportamiento de los  
<sup>465</sup> cuerpos espaciales, de aquí que los investigadores teoricen sobre su composición.

#### <sup>466</sup> **Materia oscura bariónica**

<sup>467</sup> En los primeros años de estudio del problema de la materia oscura en el Universo,  
<sup>468</sup> se propuso que esta podría ser materia bariónica y otras partículas ligadas a ellos en  
<sup>469</sup> forma de objetos compactos considerables pero con una emisión electromagnética muy  
<sup>470</sup> débil. Los candidatos a materia oscura bariónica se encuentran los gases no luminosos, los  
<sup>471</sup> objetos compactos y masivos de los halos galácticos (MACHOs) y las enanas marrones.

472 Sin embargo, múltiples líneas de evidencia contradicen este hecho, ya que contribuyen  
473 muy poco a la densidad crítica del Universo.

474 **Materia oscura no-bariónica**

475 En general, la materia oscura se puede clasificar en caliente, tibia o fría. Esta clasifi-  
476 cación se hace de acuerdo a la dispersión de velocidades de la partícula en el momento  
477 en que se desacopló del plasma primigenio:

- 478 - **Materia oscura caliente:** partículas no bariónicas que se mueven ultrarrelati-  
479 vistamente. Estas hacen referencia a una determinada partícula  $\chi$  de masa  $m_\chi$  con  
480 una velocidad relativista al momento de desacoplarse del plasma primigenio, por lo  
481 tanto, su temperatura cumple con la condición  $T_\chi \gg m_\chi$ .
- 482 - **Materia oscura fría :** partículas no bariónicas que no se mueven relativistamente  
483 al momento de desacoplarse ( $v_\chi \sim 0$ ), por lo cual  $T_\chi \ll m_\chi$ .
- 484 - **Materia oscura templada o tibia :** partículas no bariónicas que se mueven  
485 relativistamente, es decir con características intermedias de las frías y calientes, o  
486 sea, con dispersión de velocidades al momento de desacoplarse mayores a las de la  
487 materia oscura fría pero menores a las de la materia oscura caliente.

488 Algunos de los candidatos a materia oscura más populares en el área de la física de  
489 partículas son:

- 490 - **Axiones:** Esta partícula es el bosón pseudo-Goldstone que resulta del rompimiento  
491 espontáneo de la simetría Peccei-Quinn. Esta simetría se postula en 1977 en las  
492 extensiones del modelo estándar para resolver el problema de la violación carga-  
493 paridad (**CP**) de la interacción fuerte en **QCD**. Las observaciones cosmológicas y  
494 las mediciones en los acelaradores de partículas acotan la masa del axión a valores  
495 de  $\lesssim 10^{-2} \text{ eV}$  por lo que cae en la categoría de materia oscura fría. Una de las  
496 características de los axiones es que dado que tiene interacciones extremadamente  
497 débiles con otras partículas, éstas podrían no estar en equilibrio térmico en el  
498 Universo temprano.

499 Más información en: <https://wikimili.com/en/Axion>.

- 500 - **WIMPs( Weakly Interacting Massive Particles) :** son partículas que se desacoplan  
501 siendo no relativistas cuando el Universo tenía una temperatura de  $\simeq 1 \text{ GeV}$ , por lo  
502 que caen en la clasificación de materia oscura fría. Las masas de los **WIMPs** abar-  
503 can un intervalo de  $10 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$ . Como su nombre lo indica, es un partícula que  
504 interactúa débilmente y gravitacionalmente con el resto de las especies del modelo  
505 estándar.

506 Más información en: [https://wikimili.com/en/Weakly\\_interacting\\_massive\\_particles](https://wikimili.com/en/Weakly_interacting_massive_particles)

508 Entre los candidatos se encuentran:

- **LSP** (Lightest Supersymmetric Particle) : es el nombre genérico dado a la más ligera de las partículas hipotéticas adicionales que se encuentran en los modelos supersimétricos. En modelos con conservación de paridad R, el **LSP** es estable; en otras palabras, el **LSP** no puede descomponerse en ninguna partícula del **SM** ya que poseen paridad R opuesta. Algunos ejemplos más conocidos son el sneutrino ligero, el neutralino ligero y el gravitonio.
- **LKP** (Lightest Kaluza-Klein Particle) : son las partículas hipotéticas que cumplen con la teoría de Kaluza-Klein (teoría **KK**) unificadora de la gravedad y electromagnetismo construida alrededor de la idea de una quinta dimensión más allá de los cuatro habituales del espacio y el tiempo, siendo considerada precursor de la teoría de cuerdas. Algunos de sus candidatos ligeros son el fotón **KK** y el neutrino **KK**, con masas en la escala  $TeV$  (para mas información, ver referencia Servant y Tait [2003]).
- **SIMPs** (Strongly Interacting Massive Particles) : se supone que los piones oscuros interactúan mucho más fuertemente entre sí, se sugiere que en el universo primitivo los piones oscuros habrían chocado entre sí, reduciendo la cantidad de materia oscura, pero a medida que el universo se expande, las partículas colisionarían cada vez con menos frecuencia, hasta ahora, cuando se extienden de manera tan delgada que casi nunca se encuentran. En la nueva hipótesis, los piones de materia oscura están formados por quark de materia oscura que se mantienen unidos por gluones de materia oscura. (Los quarks ordinarios están unidos por gluones normales), en esta propuesta el gluón oscuro tendría masa.

### 1.3.3. Partículas supersimetrías.

En la física de partículas, la supersimetría es una simetría hipotética propuesta que relacionaría las propiedades de los bosones y los fermiones. Aunque todavía no se ha verificado experimentalmente que la supersimetría sea una simetría de la naturaleza, es parte fundamental de muchos modelos teóricos, incluyendo la teoría de supercuerdas, la supersimetría también conocida por **SUSY**(**SUperSYmmetry**) siendo una de las teorías más populares que postulan la existencia de física más allá del **SM**.

De forma general el **SM** se construye a partir de simetrías muy fundamentales que dan lugar a leyes de conservación, en el caso de **SUSY**, esta incluye todas las simetrías que ya contiene el **SM** y añade otra más que involucra al espín. Lo que postula **SUSY** es que a cada partícula del **SM**le corresponde un compañero supersimétrico que tiene el espín contrario, o sea, por cada fermión, **SUSY**añade un bosón y por cada bosón añade un fermión. Por tanto, el número de partículas predicho por **SUSY**es el doble que en el Modelo Estándar, como se visualiza en la Figura 1-5.

Se teoriza que **SUSY**puede dar solución al problema de la materia oscura mediante su teorizada relación con la materia del **SM**, en la mayoría de modelos de supersimetría, la partícula supersimétrica más ligera o **LSP**(mencionada anteriormente) es necesariamente neutra y estable. Esto significa que nuestro Universo estaría lleno de estas partículas

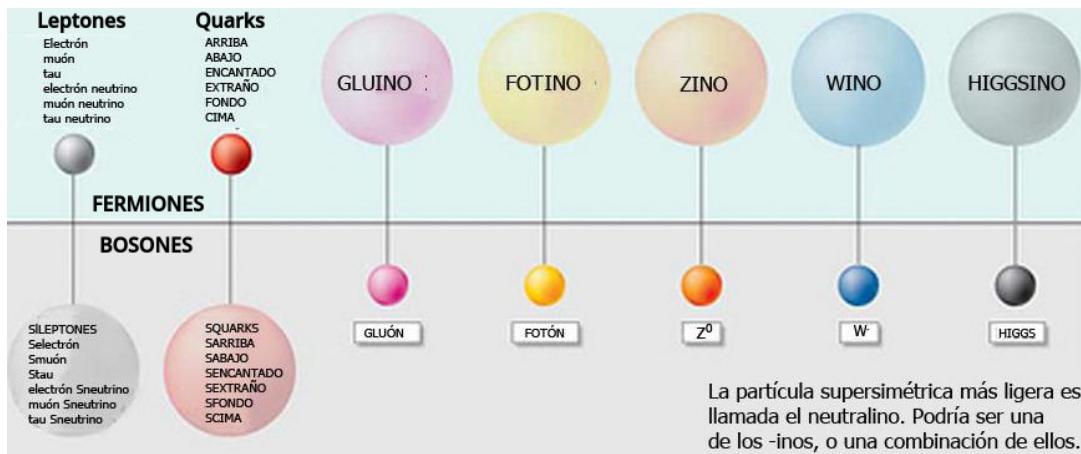


Figura 1-5: Extensión del Modelo Estandar bajo la existencia de la supersimetría (**SUSY**).

549 masivas, neutras y estables, que por tanto serían buenas candidatas a formar la materia  
 550 oscura.

551 Sin embargo, debido a que dichas compañeras supersimétricas aún no han podido  
 552 ser creadas en el laboratorio, sus masas deben ser mucho mayores que las de las par-  
 553 tículas originales. Esto implica que la supersimetría, de ser cierta, está rota por algún  
 554 mecanismo, la especificación de dicho mecanismo da lugar a diversas simplificaciones del  
 555 **MSSM**, donde algunas partículas supersimétricas, como el neutralino, podrían explicar  
 556 el problema de la materia oscura del universo.

557 La supersimetría (**SUSY**) es una simetría espacio-temporal que mapea partículas y  
 558 campos de espín entero (bosones) en partículas y campos de espín entero medio (fermio-  
 559 nes), y viceversa. Los generadores  $Q$  actúan como:

$$Q|\text{Fermion}\rangle = |\text{Boson}\rangle \quad \text{y} \quad Q|\text{Boson}\rangle = |\text{Fermion}\rangle \quad (1-6)$$

560 Desde su propia definición, este operador tiene dos propiedades de gran alcance:

561 - Cambia el spin de una partícula y como resultado sus propiedades espacio-temporales.  
 562 Es por eso que la supersimetría no es una simetría interna sino una simetría de  
 563 espacio-tiempo.

564 - En una teoría donde se realiza la supersimetría, cada estado de una partícula tiene  
 565 al menos un supercompañero. Por lo tanto, en un entorno **SUSY**, en lugar de  
 566 estados de partículas individuales, uno tiene que lidiar con (super) múltiplos de  
 567 estados de partículas.

568    **1.3.4. Extensión del Modelo Estándar con Supersimetría.**

569    En el año 1973 por Julius Wess y Bruno Zumino presentan un modelo en la física  
570 de partículas el cual es conocido con el nombre de Modelo de Wess-Zumino, este es  
571 un modelo mínimo supersimétrico con solo un fermión y su super compañero bosón. A  
572 pesar de que el modelo de Wess-Zumino no representa un modelo físico real, sirvió para  
573 fundamentar ciertos aspectos de los modelos físicos supersimétricos teorizados.

574    El primer modelo supersimétrico compatible con el modelo estándar de la física de  
575 partículas llamado **MSSM** (Modelo Mínimo Estándar Supersimétrico) este fue enun-  
576 ciado en el año 1981 por Howard Georgi y Savas Dimopoulos, este postulaba la existencia  
577 de super compañeros de las partículas del modelo estándar en la región entre  $100 \text{ GeV}$   
578 hasta  $1 \text{ TeV}$ , prediciendo su aparición en los experimentos de coalisiones de partículas  
579 aceleradas.

580    El **MSSM** no es la única opción posible para la supersimetría más allá del **SM**, sino  
581 la más económica, en esta teoría se agrega un supercompañero a cada partícula **SM**, por  
582 lo tanto, introduce el higgsino, thewino, el zino, junto con todos los squarks y sleptons, y  
583 nada más. Existen muchas extensiones supersimétricas no mínimas del Modelo Estándar  
584 . En principio, se puede construir cualquier **SSM** (SuperSymmetry Model), sin embargo,  
585 se deben tener en cuenta varias limitaciones al realizarlo.

586    La única forma inequívoca de reclamar el descubrimiento de la supersimetría es produ-  
587 cir superpartículas en el laboratorio. Debido a que se espera que las superpartículas sean  
588 de 100 a 1000 veces más pesadas que el protón, se requiere una gran cantidad de energía  
589 para hacer estas partículas que solo se pueden lograr en los aceleradores de partículas.

590    El **MSSM** impone la paridad R para explicar la estabilidad del protón agregando  
591 una ruptura de supersimetría al introducir operadores explícitos en el Lagrangiano que  
592 se le comunica mediante una dinámica desconocida, significando la presencia de 120  
593 parámetros nuevos en el **MSSM**.

594    **Lagrangiano del modelo MSSM.**

595    Desde el punto de vista experimental, ninguna de las compañeras supersimétricas de  
596 las partículas del **SM** han sido observadas hasta el momento. Si una teoría es invariante  
597 bajo transformaciones supersimétricas, las partículas y sus correspondientes supercom-  
598 pañeras deben tener masas idénticas. Aunque no se conoce el mecanismo de ruptura de  
599 **SUSY**, este debe ser implementado de forma de que pueda proveer la solución al pro-  
600 blema de jerarquía incluso en presencia del rompimiento de esta. Para ello, las relaciones  
601 entre los acoplamientos adimensionales de la teoría antes del rompimiento deben mante-  
602 nerse. Es por esta razón que el rompimiento de la supersimetría debe ser «suave», y el  
603 lagrangiano efectivo del **MSSM** tiene que poder ser escrito como:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SUSY} + \mathcal{L}_{soft} \quad (1-7)$$

604 donde  $\mathcal{L}_{SUSY}$  contiene todas las interacciones de gauge de Yukawa preservando la in-  
605 variancia supersimétrica. El lagrangiano que rompe **SUSY**,  $\mathcal{L}_{soft}$ , no está completa-  
606 mente determinado y su forma explícita así como el conjunto de parámetros involu-  
607 crados dependen del mecanismo particular de ruptura de **SUSY** implementado, de  
608 forma general, sin indagar en sus orígenes, se fijan solo pidiendo la invariancia frente  
609  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  haciendo más fácil mantener la cancelación de las diver-  
610 gencias cuadráticas, los términos *soft* proveen exitosamente las masas de las  
611 partículas supersimétricas, a fin de que sean más pesadas que sus correspondientes com-  
612 pañeras del **SM**, y la ruptura espontánea de la simetría electrodébil requerida a bajas  
613 energías necesaria para explicar la generación de las masas de las partículas.

614 Debido a que la diferencia de masas entre las partículas conocidas del **SM** y sus super-  
615 compañeras las masas de las partículas supersimétricas no pueden ser demasiado grandes,  
616 sino se perdería la solución al problema de jerarquía, pero por otro lado, también existe  
617 una razón por la cual las partículas supersimétricas deben ser lo suficientemente pesadas  
618 para no haber sido descubiertas hasta ahora. Todas las partículas del **MSSM** que han si-  
619 do observadas tienen algo en común: deberían no tener masa en ausencia del rompimiento  
620 de la simetría electrodébil. Además cada partícula del **MSSM** puede tener un término  
621 de masa en el lagrangiano en ausencia del rompimiento de la simetría electrodébil.

622 En un tratamiento fenomenológico completo todos los parámetros del **MSSM** debe-  
623 rían dejarse libres y determinarse a partir de los datos observados, y luego de que los  
624 parámetros hayan sido medidos, se podría intentar extraer información de la física sub-  
625 yacente que está asociada con escalas de energía mayores a la de los experimentos. Sin  
626 embargo, realizar predicciones y análisis fenomenológicos con esta cantidad de paráme-  
627 tros es impracticable, por lo cual es necesario realizar suposiciones para reducir los grados  
628 de libertad. Es debido a este motivo que no existe una definición precisa del **MSSM** y  
629 es importante conocer cuales son las suposiciones que se han hecho cuando se realiza un  
630 determinado análisis.

### 631 **Insuficiencias del modelo MSSM.**

632 Hay varios problemas con el **MSSM**, la mayoría de ellos cayendo en la comprensión  
633 de los parámetros que lo componen, algunos de estos son:

- 634 - El problema  $\mu$ : el parámetro de masa de Higgsino  $\mu$  aparece como un término en  
635 el superpotencial, este debe tener el mismo orden de magnitud que la escala de  
636 electroválvula, muchos órdenes de magnitud más pequeños que el de la escala de  
637 Planck, que es la escala de corte natural. Los términos de ruptura de la supersi-  
638 metría suave también deben ser del mismo orden de magnitud que la escala de  
639 electrodébil. Esto provoca un problema de naturalidad.
- 640 - La pequeñez de las fases de violación de **CP**: dado que hasta ahora no se ha  
641 descubierto ninguna violación de **CP** adicional a la predicha por el modelo estándar,  
642 los términos adicionales en el lagrangiano del **MSSM** deben ser invariantes de **CP**,  
643 por lo que sus fases de violación de **CP** son pequeñas.

644 **Más alla del modelo MSSM.**

645 En física de partículas, **NMSSM**(Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model.)  
646 es una extensión supersimétrica del Modelo Estándar que agrega un supercampo quiral  
647 singlete adicional al **MSSM** y puede usarse para generar dinámicamente el parámetro  $\mu$   
648 resolviendo el problema derivado del mismo.

649 **Origen de la ruptura de SUSY.**

650 Debido a que no se ha observado ninguna de las partículas supersimétricas predichas,  
651 si existe **SUSY**, debe estar rota, y para mantener la solución al problema de jerarquía  
652 incluso en presencia del rompimiento de ésta, el rompimiento debe ser suave, incluyendo  
653 términos *soft* al lagrangiano, para el caso de **NMSSM** el rompimiento de SUSY es intro-  
654 ducido explícitamente. El rompimiento de una simetría global siempre implica un modo  
655 no masivo de Nambu-Goldstone con los mismos números cuánticos que el generador de la  
656 simetría rota. El rompimiento espontáneo de SUSY tiene que ocurrir en un “sector ocul-  
657 to” de partículas que no tienen acoplamientos directos con los supermultipletes quirales  
658 (“sector visible”) del **NMSSM**, sin embargo, estos dos sectores comparten algunas in-  
659 teracciones que son las responsables de mediar el rompimiento de la supersimetría desde  
660 el sector oculto al visible.

661 **1.3.5. Modelo Dark-SUSY.**

662 En el **SUSY** oscuro es uno de los modelos que describe el origen de la ruptura espontá-  
663 nea  $U(1)$  (una simetría global de Peccei-Quinn), dando lugar a fotones oscuros ( $g_\gamma$ ) que  
664 se acoplan débilmente a las partículas **SM** a través de un parámetro de mezcla cinética.  
665 En este caso se teoriza que el neutralino más ligero  $n_1$  en el “sector visible” de **SUSY** ya  
666 no es estable y puede descomponerse a través de procesos como  $n_1 \rightarrow n_D + \gamma_D$ , donde  
667  $n_D$  es un fermión oscuro (neutralino oscuro) que escapa a la detección. En estos modelos,  
668 las desintegraciones de  $\gamma_D$  a menudo están mediadas por interacciones muy débiles con  
669 el **SM**, y en gran parte del espacio de parámetros disponibles tienen una larga vida útil.

670 La falta de un exceso de antiprotones en las mediciones del espectro de rayos cósmicos  
671 limita la masa del fotón del sector oscuro  $\gamma_D \leq 2m_p$ . Suponiendo que  $\gamma_D$  solo puede  
672 descomponerse en partículas **SM**, la fracción de ramificación ( $\gamma_D \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ) puede ser  
673 tan grande como 45% esto dependiendo de  $m_{\gamma_D}$ . Si el acoplamiento a las partículas  
674 **SM** está altamente suprimido, entonces la masa  $m_{\gamma_D}$  también puede tener una vida útil  
675 no despreciable y recorrer cierta distancia antes de la descomposición. Por lo tanto, es  
676 importante acomodar la posibilidad de fotones oscuros de larga duración en nuestras  
677 búsquedas.

678 Las nuevas fuerzas ocultas en los escenarios de Dark SUSY pueden acoplarse a la  
679 hipercarga **SM** a través de un término de mezcla cinética en lagrangiano:

$$L_{KM} \sim \frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu}^\gamma F^{\mu\nu} \quad (1-8)$$

680 donde  $F_{\mu\nu}^\gamma = \partial_\mu A_\nu^D - \partial_\nu A_\mu^D$  y  $A^D$  es el campo de calibre oscuro [37-39]. Si el  $A_D$  es masivo,  
 681 entonces las partículas SM adquieren una carga adicional  $\epsilon e$  bajo la interacción oscura.  
 682 Tenga en cuenta que en los escenarios típicos del SUSY oscuro con mezcla cinética del  
 683 parámetro  $\epsilon$  está dentro del rango  $10^{-8} - 10^{-2}$ .

684 Se prueba que debido a la mezcla cinética, el fotón oscuro se descompondrá en leptones  
 685 SM con un ancho parcial dado por:

$$\Gamma_{\gamma_D \rightarrow l\bar{l}} = \frac{1}{3} \alpha \epsilon^2 m_{\gamma_D} \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_{\gamma_D}^2}} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_{\gamma_D}^2}\right) \quad (1-9)$$

686 donde  $m_l$  es la masa del lepton y los diferentes modos de descomposición comienzan  
 687 desde  $m_{\gamma_D} > 2m_l$ . Además, el fotón oscuro se descompondrá en hadrones SM para masas  
 688  $m_{\gamma_D} > 2m_\pi$ , con ancho parcial dado por:

$$\Gamma_{\gamma_D} \rightarrow = \frac{1}{3} \alpha \epsilon^2 m_{\gamma_D} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{m_{\gamma_D}^2}} \left(1 + \frac{2m_\mu^2}{m_{\gamma_D}^2}\right) R(s = m_{\gamma_D}^2) \quad (1-10)$$

689 donde  $R = \sigma_{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}} / \sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}$ . Los datos de la sección transversal hadrónica  
 690 están disponibles en la bibliografía científica resultado de varias mediciones experimen-  
 691 tales, resultado de estas pero solo se mide a partir de  $\sqrt{s} = 0.36 \text{ GeV}/c^2$ , que está por  
 692 encima del umbral  $2m_\pi = 0.28 \text{ GeV}/c^2$ . Por lo tanto, en la región donde  $< 0.36 \text{ GeV}/c^2$ ,  
 693 usamos la sección transversal para  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Finalmente, para la región donde  
 694  $\sqrt{s} < 2m_\pi$ , sumamos solo los anchos parciales de leptones.

Tabla 1-1: Ancho total y  $f(m_{\gamma_D})$ .

	$m_{\gamma_D}, \text{GeV}/c^2$								
	0.25	0.275	0.3	0.4	0.7	1	1.5	2	8.5
$\Gamma_{\gamma_D \text{Total}/\epsilon^2} [\text{MeV}]$	1	1.2	1.9	2.1	11.4	8.0	15.5	20.3	114.6
$f(m_{\gamma_D}) [\text{GeV}^{-1}]$	952.9	817.2	538.9	480.2	87.4	125.1	64.6	49.2	8.7

695 Según las expresiones (1-9) y (1-10), las dependencias del ancho parcial de  $\epsilon$  y  $m_{\gamma_D}$   
 696 pueden factorizarse como  $(\Gamma_{\gamma_D}/\epsilon^2)^{-1} = f(m_{\gamma_D})$ , donde  $f(m_{\gamma_D})$  es solo dependiente de la  
 697 masa del fotón oscuro. Los anchos parciales para los diferentes modos de decaimiento del  
 698 fotón oscuro y su ancho total (todos divididos por  $\epsilon^2$  para demostrar solo la dependencia  
 699 de los anchos con  $m_{\gamma_D}$ ) se muestran en la Tab. 1-1. La relación de ramificación para  
 700 la descomposición del fotón oscuro a un par de muones  $B_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu} = \Gamma_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu} / \Gamma_{\gamma_D \text{Total}}$  no  
 701 depende de  $\epsilon$ , y se muestra como función de  $m_{\gamma_D}$ . Esta relación de ramificación  $B_{\gamma_D \rightarrow \mu\mu}$   
 702 tiene un mínimo en  $m_{\gamma_D} \sim 0.8 \text{ GeV}/c^2$ , donde predomina el decaimiento del fotón oscuro  
 703 en hadrones.

704 Las expresiones para los anchos parciales permiten el cálculo del tiempo de vida del

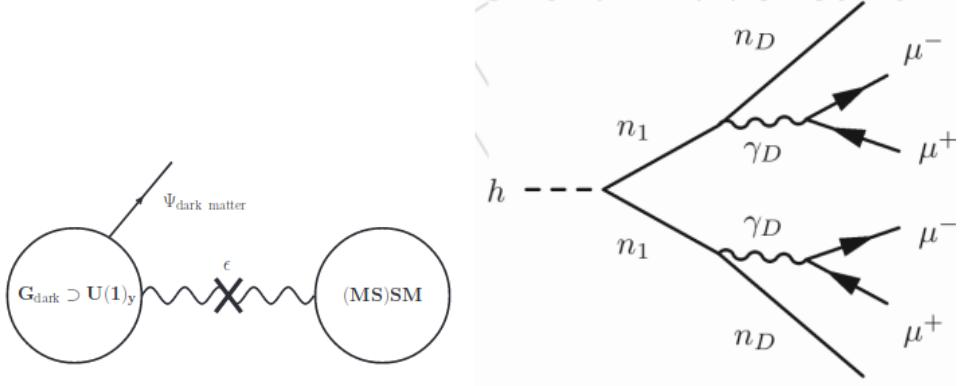


Figura 1-6: Ilustración esquemática de la conexión entre el sector oscuro y el modelo estándar, los cuales están conectados mediante un término de mezcla dinámica.

705 fotón oscuro:

$$\tau_{\gamma_D} = \frac{1}{\Gamma_{\gamma_D Total}} = \frac{1}{\Gamma_{\gamma_D \rightarrow e^+ e^-} + \Gamma_{\gamma_D \rightarrow \mu^+ \mu^-} + \Gamma_{\gamma_D \rightarrow hadrons}} \quad (1-11)$$

706 El tiempo de vida está directamente relacionada con el parámetro  $\epsilon$  y la masa del fotón  
707 oscuro se obtiene:

$$\tau_{\gamma_D}(\epsilon, m_{\gamma_D}) = \frac{1}{\epsilon^2} \times f(m_{\gamma_D}) \quad (1-12)$$

708 Es conveniente representar el tiempo de vida  $\tau_{\gamma_D}$  en unidades de distancia  $c\tau_{\gamma_D}$ , donde  $c$  es  
709 la velocidad de la luz. También es conveniente medir  $c\tau_{\gamma_D}$  en milímetros porque la sensi-  
710 bilidad del análisis a esta variable es  $\sigma(mm)$ . Las restricciones sobre  $\epsilon$  y la masa del fotón  
711 oscuro podrían obtenerse a partir de las restricciones sobre la vida útil del fotón oscuro  
712 porque están directamente relacionadas entre sí, como ya se comprobó anteriormente.

713 El diagrama de Feynman del proceso del SUSY oscuro  $h \rightarrow 2n_1 \rightarrow 2n_D + 2\gamma_D \rightarrow$   
714  $2n_D + 4\mu$  se muestra en la Fig. 1-6. Este modelo de referencia es solo un escenario  
715 posible, y se elige como una representación única de un rango muy amplio de espacio  
716 de parámetros disponibles. Este modelo simple del sector oscuro se puede ampliar de  
717 varias maneras; versiones más complejas involucran otros bosones oscuros de Higgs,  $W$   
718 y  $Z$ . También hay muchos otros procesos permitidos, como por ejemplo  $pp \leftarrow h \leftarrow$   
719  $Z_D Z/Z_D Z_D/Z_a \leftarrow 4\mu$ . En este análisis representamos los resultados de una manera que  
720 permite reinterpretaciones adicionales en el marco de otros modelos.a

721 Entre sus observaciones más recientes 3.5 se ha reportado un flujo de positrones  
722 anómalo que tiene una posible explicación en el proceso de aniquilación de partículas  
723 de materia oscura, donde se libera energía en forma de positrones. Dicho flujo anómalo  
724 puede observarse a partir de los 25 GeV en la Figura 1-7 donde también se presenta una  
725 comparación con otros experimentos que observan similar comportamiento.

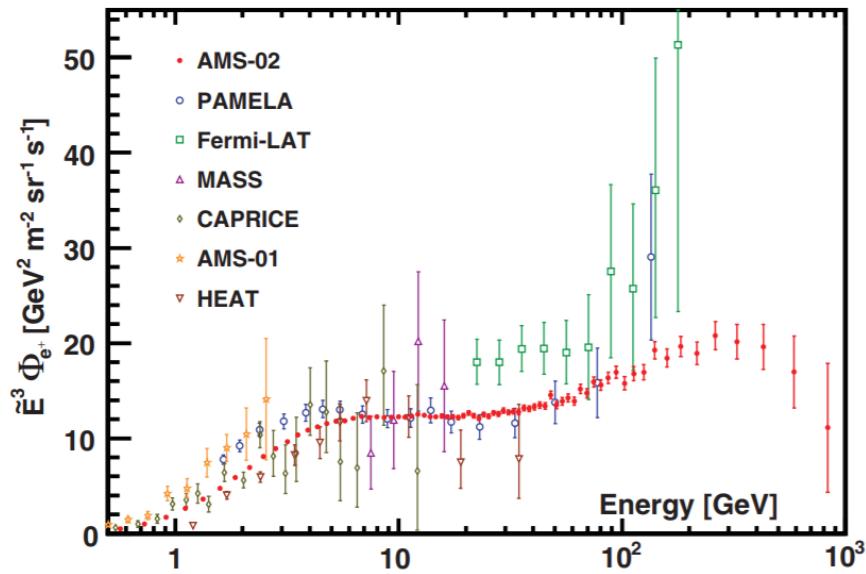


Figura 1-7: Flujo de positrones medido por el experimento AMS-02, comparado con los experimentos PAMELA, Fermi-LAT, MASS, CAPIRCE, AMS-01 y HEAT.

726     Estas observaciones cosmológicas han motivado a los físicos teóricos de altas energías  
 727     a postular nuevos modelos en los cuales la composición de la materia oscura se pueda  
 728     entender por medio de nuevas partículas elementales no descritas en el modelo estándar y  
 729     que sin embargo podrían estar siendo producidas en los aceleradores de partículas moder-  
 730     nes como el Gran Colisionador de Hadrones en Ginebra, Suiza. Los modelos propuestos  
 731     se encuentran en la categoría que se conoce como extensiones al modelo estándar y por lo  
 732     general involucran la existencia de nuevas partículas cuyas fuerzas e interacciones están  
 733     descritas por alguna variación de la teoría cuántica de campo, lo que sugiere que sus  
 734     mecanismos de producción y propiedades pueden ser estudiados por el formalismo de  
 735     la física de partículas y la parte experimental por medio de los detectores de partículas  
 736     con métodos de recolección de datos, selección de eventos y técnicas estadísticas para el  
 737     análisis y extracción de posibles señales.

### 738     1.3.6. Formulación Teórica

“La discrepancia entre lo que se esperaba y lo que se ha observado ha aumentado a lo largo de los años, y nos estamos esforzando cada vez más por llenar el vacío.”

*Jeremiah P. Ostriker*

## <sup>739</sup> Capítulo 2

# <sup>740</sup> Experimento y Simulación.

<sup>741</sup> En este capítulo se realizará una descripción de todos los métodos experimentales y  
<sup>742</sup> computacionales necesarios para el cumplimiento de los objetivos, estos serán descritos  
<sup>743</sup> para su mejor comprensión en el proceso de simulación, caracterización y análisis de  
<sup>744</sup> resultados. Además se resumirán los resultados que servirán de antecedentes para la  
<sup>745</sup> investigación.

### <sup>746</sup> 2.1. Física de Altas Energías.

<sup>747</sup> La Organización Europea para la Investigación Nuclear **CERN**(Conseil Européen  
<sup>748</sup> pour la Recherche Nucléaire) es una organización de investigación europea que opera el  
<sup>749</sup> laboratorio de física de partículas más grande del mundo, está situado en Suiza cerca a  
<sup>750</sup> la frontera con Francia, entre la comuna de Saint-Genis-Pouilly y la comuna de Meyrin.  
<sup>751</sup> La función principal del **CERN** es proporcionar los aceleradores de partículas y otra  
<sup>752</sup> infraestructura necesaria para la investigación de física de alta energía; como resultado,  
<sup>753</sup> se han construido numerosos experimentos en el **CERN** a través de colaboraciones inter-  
<sup>754</sup> nacionales. El sitio principal de Meyrin alberga una gran instalación informática, que se  
<sup>755</sup> utiliza principalmente para almacenar y analizar datos de experimentos, así como para  
<sup>756</sup> simular eventos. Los investigadores necesitan acceso remoto a estas instalaciones, por lo  
<sup>757</sup> que el laboratorio ha sido históricamente un importante centro de red de área amplia.  
<sup>758</sup> En la Fig. 2-1a se muestra un diagrama de las instalaciones y los proyectos en los que  
<sup>759</sup> está dividido.

<sup>760</sup> El **CERN** es fundamentalmente un conjunto interconectado de aceleradores de par-  
<sup>761</sup> tículas cuyo primer elemento, el Sincro-Ciclotrón de protones o **SC** (Synchro-Cyclotron)  
<sup>762</sup> se empieza a construir a mediados de 1955, sustituido por el Gran Colisionador de Hadrones  
<sup>763</sup> o **LHC**(Large Hadron Collider) puesto en funcionamiento el 2008. En la actualidad,  
<sup>764</sup> gran parte de la actividad experimental que se realiza en el **CERN** está concentrada en  
<sup>765</sup> la construcción de los experimentos para el **LHC**:

<sup>766</sup> - **ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS) : Investiga una amplia gama de física,  
<sup>767</sup> desde la búsqueda del bosón de Higgs hasta dimensiones adicionales y partículas

que podrían formar materia oscura. Aunque tiene los mismos objetivos científicos que el experimento CMS, utiliza diferentes soluciones técnicas y un diseño de sistema magnético diferente.

**Página del proyecto :** <https://atlas.cern/>

- **CMS**(Compact Muon Solenoid) : Tiene un amplio programa de física que va desde el estudio del Modelo estándar (incluido el bosón de Higgs) hasta la búsqueda de dimensiones y partículas adicionales que podrían formar materia oscura. Está construido alrededor de un gran imán de solenoide.

**Página del proyecto :** <https://cms.cern/detector>

- **LHCb** (Large Hadron Collider beauty) : experimento especializado en física del quark b, algunos de cuyos objetivos son la medida de parámetros de violación de simetría **CP** en las desintegraciones de hadrones que contengan dicho quark o la medida de precisión de las fracciones de desintegración (“branching ratios”) de algunos procesos extremadamente infrecuentes.

**Página del proyecto :** <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>

- **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) : es un detector de iones pesados, estudiar la física de la materia que interactúa fuertemente a densidades de energía extremas, donde se forma una fase de la materia llamada plasma quark-gluón.

**Página del proyecto :** <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>

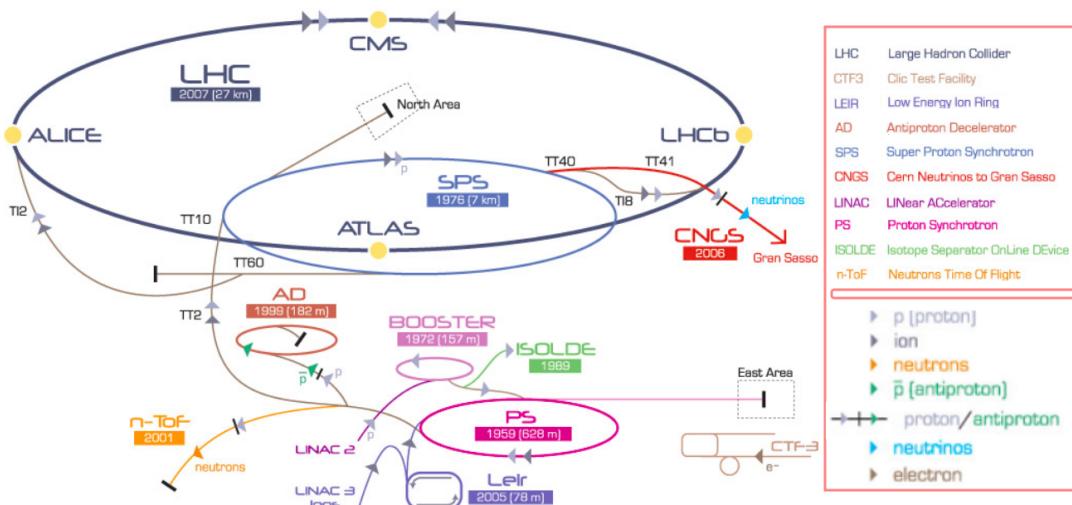


Figura 2-1: Diagrama de los experimentos que componen el centro de investigación del CERN.

Uno de los experimentos considerado por sus resultados de los mas importantes es el CMS, el cual es uno de los detectores multi-usos del CERN como se puedo constatar anteriormente, dicho detector tiene la capacidad de cubrir un amplio rango de procesos físicos, siendo este junto con el experimento ATLAS los que reportaron la observación de la partícula de Higgs en el 2012. El mismo es uno de los recursos principales para las investigaciones relacionadas con la exploración de la materia oscura.

793 El experimento **LHC** está continuamente en proceso de actualización con el objetivo  
 794 de proporcionar mediciones más precisas de nuevas partículas y permitiendo observar rara  
 795 vez procesos teorizados y de esta intentar aumentar nuestros conocimientos de la materia  
 796 oscura. Esto se debe a que el número de eventos de un dado proceso producidos en un  
 797 colisionador está dado por:

$$N = L\sigma \quad (2-1)$$

798 donde  $\sigma$  es la sección eficaz del proceso físico y  $L$  es la luminosidad integrada del acelera  
 799 dor.

800 La luminosidad instantánea es uno de los parámetros más importantes para caracte  
 801 rizar el funcionamiento del acelerador, definida como el número de partículas (protónes  
 802 o iones pesados en el caso del **LHC**) por unidad de tiempo y unidad de área, y puede  
 803 calcularse mediante la relación:

$$\mathcal{L} = f_{rev} n_b \frac{N_1 N_2}{A} \quad (2-2)$$

804 donde  $f_{rev}$  es la frecuencia de revolución,  $n_b$  es el número de bunches (paquetes de pro  
 805tones) por haz,  $N_i$  es el número de partículas en cada bunch y  $A$  es la sección efectiva  
 806 del haz, que puede expresarse en término de los parámetros del acelerador como:

$$A = \frac{4\pi\epsilon_n\beta^*}{\gamma F} \quad (2-3)$$

807 donde  $\epsilon_n$  es la emitancia transversal normalizada (la dispersión transversal media de las  
 808 partículas del haz en el espacio de coordenadas e impulsos),  $\beta^*$  es la función de amplitud  
 809 en el punto de interacción, relacionada al poder de focalización de los cuadrupolos),  $\gamma$   
 810 es el factor relativista de Lorentz y  $F$  es un factor de reducción geométrico, debido al  
 811 ángulo de cruce de los haces en el punto de interacción.

### 812 2.1.1. Actualizando HLC.

813 El programa de línea de base del **LHC** tenía el objetivo de producir los primeros  
 814 resultados en la carrera 2010-2012 con el objetivo de una luminosidad integrada de al  
 815 menos  $1 fb^{-1} = 40 m^2$  para fines de 2011 y gracias a un rendimiento mejor de lo previsto  
 816 se obtuvo más de  $25 fb^{-1}$  en colisión de  $pp$  a finales de 2012, más allá de cualquier  
 817 expectativa. Después se alcanzó la energía de  $13 - 14 TeV$  de centro de masa de energía  
 818 en 2015.

819 Después de 2019, la ganancia estadística al ejecutar el acelerador sin un aumento  
 820 considerable de luminosidad más allá de su valor de diseño fue más de la prevista. El  
 821 tiempo de ejecución necesario para reducir a la mitad el error estadístico en las medicio  
 822 nes. Por lo tanto, para mantener el progreso científico y explorar su capacidad total, el  
 823 **LHC** necesitará un aumento decisivo de su luminosidad. Por eso, cuando el Consejo del  
 824 CERN adoptó la Estrategia Europea para la Física de Partículas en Bruselas el 30 de

825 mayo de 2013, se acordó que su primera prioridad sería:

“La máxima prioridad de Europa debería ser la explotación de todo el potencial del **LHC**, incluido el actualización de alta luminosidad de la máquina y los detectores con el fin de recopilar diez veces más datos que en el diseño inicial, 826 alrededor de 2030”

cita traducida de la referencia Wells [2015]

827 Además se reemplazarán los imanes triples internos (el responsable de exprimir el rayo  
828 en caso de colisión) y de todos los cambios de hardware necesarios para permitir una am-  
829 biciosa actualización de luminosidad. Con algunas de las modificaciones ya cumplidas en  
830 2019 (*LS2*), esta nueva fase de la vida del **LHC** se ha denominado “**LHC** de alta lumino-  
831 sidad” (**HL-LHC**) y tiene la aspiración de alcanzar el sorprendente umbral de  $3000 \text{ fb}^{-1}$   
832 en 10-12 años, entregando hasta la actualización aproximadamente  $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$  durante  
833 ese período (ver Fig. 2-2).

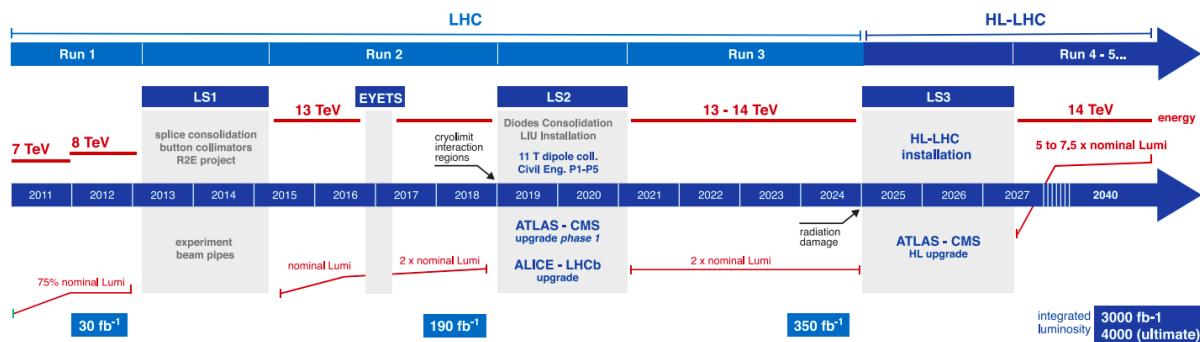


Figura 2-2: Plan de actualización del experimento **LHC**. Pagina de origen: <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>.

834 Con la actualización del **LHC** se espera aumentar los conocimiento más allá del Mo-  
835 delo Estándar y su bosón de Higgs, siendo sus apuestas a la misteriosa materia oscura, con  
836 la teoría de la supersimetría. Pero para lograr actualizar una maquinaria tan compleja a  
837 tan gran escala se planifica una década en completarse. El proceso depende de una serie  
838 de tecnologías innovadoras que el proyecto **HL-LHC** está explorando. Esta extraordina-  
839 ria empresa técnica dependerá de una combinación de imanes superconductores  $11 - 12 \text{ T}$   
840 de vanguardia, cavidades de radiofrecuencia superconductoras compactas y ultraprecisas  
841 para la rotación del haz, así como enlaces superconductores de alta potencia de  $100 \text{ m}$  de  
842 largo con disipación de energía cero. Además, las altas luminosidades generarán nuevas  
843 demandas de vacío, criogenia y protección de la máquina, y requerirán nuevos conceptos  
844 para la colimación y el diagnóstico, modelado avanzado para el haz intenso y nuevos  
845 esquemas de cruce del haz para maximizar la salida física de las colisiones.

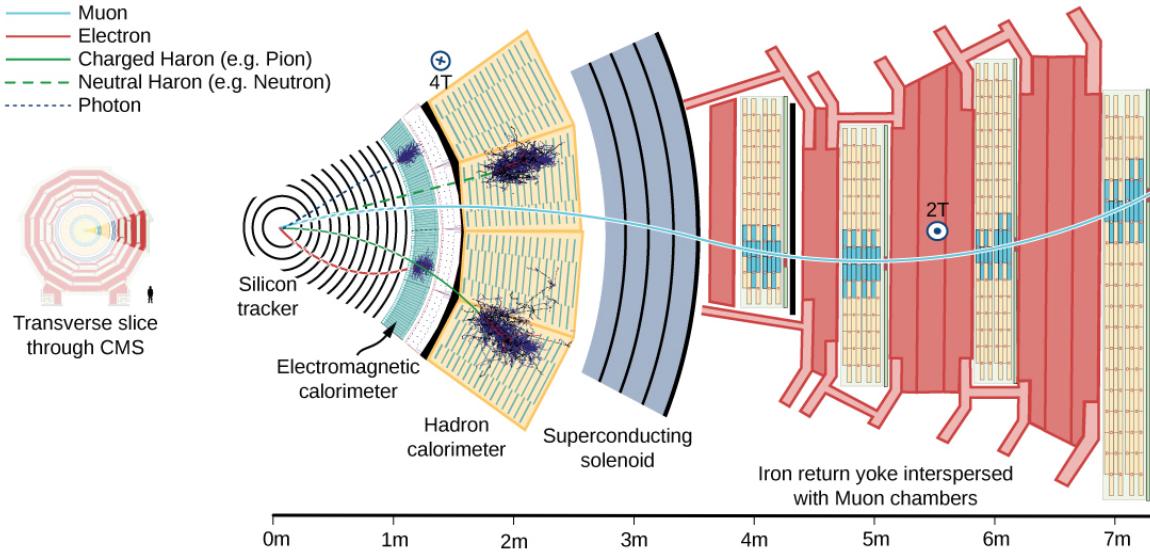


Figura 2-3: Detector de solenoide de muón compacto. El detector consta de varias capas, cada una responsable de medir diferentes tipos de partículas. Pagina de origen: <http://ippog.web.cern.ch/resources/2011/cms-slice-july-2010-version>.

## 846 2.2. Experimento CMS.

847 El experimento Solenoide Compacto de Muones o **CMS**(Compact Muon Solenoid)  
 848 tiene la capacidad de cubrir un amplio rango de procesos físicos, este experimento consiste  
 849 de varios subsistemas los cuales están diseñados para la identificación de prácticamente  
 850 todas las partículas del modelo estándar. Para su diseño se tomó en cuenta cómo cada  
 851 partícula interacciona con la materia, por ejemplo las partículas cargadas son identificadas  
 852 por medio de detectores a base de silicio y de gas noble, permitiendo determinar con  
 853 precisión el tiempo y localización de las partículas. La variedad de interacciones por tipo  
 854 de partícula se puede ver en la Fig. 2-3.

855 El CMS es un detector de propósito general, capaz de estudiar múltiples aspectos de  
 856 las colisiones de protones hasta 14 TeV. También contiene sistemas para medir la energía  
 857 y la cantidad de movimiento de fotones, electrones, muones y otras partículas producto  
 858 de las colisiones. La capa detectora se pueden dividir en:

- 859 - **El rastreador de Silicio (The Silicon tracker)** : para calcular el momento de  
 860 una partícula es rastrear su camino a través de un campo magnético; cuanto más  
 861 curvaba el camino, menos impulso tenía la partícula. El rastreador CMS registra los  
 862 caminos tomados por las partículas cargadas al encontrar sus posiciones en varios  
 863 puntos clave. De esta forma se reconstruyen los caminos de muones de alta energía,  
 864 electrones y hadrones (partículas formadas por quarks), así como ver las huellas  
 865 que provienen de la descomposición de partículas de vida muy corta.

866 El rastreador **CMS** está hecho completamente de silicio: los píxeles, en el núcleo  
867 mismo del detector y que se ocupan de la mayor intensidad de partículas, y los  
868 detectores de microstrip de silicio que lo rodean. A medida que las partículas via-  
869 jan a través del rastreador, los píxeles y las microstrips producen pequeñas señales  
870 eléctricas que se amplifican y detectan. El rastreador emplea sensores que cubren  
871 un área del tamaño de una cancha de tenis, con 75 millones de canales de lectura  
872 electrónica separados: en el detector de píxeles hay unas 6,000 conexiones por  
873 centímetro cuadrado.

874 **Actualización de Alta Luminosidad :**

875 La actualización esperada de **HL-LHC** aumentará el número de interacciones hasta  
876 el punto en que la ocupación excesiva reduciría significativamente la efectividad de  
877 la búsqueda de pistas. Se planea una actualización para aumentar el rendimiento y  
878 la tolerancia a la radiación del rastreador.

- 879 - **Calorímetro electromagnético o ECAL** (Electromagnetic CALorimeter) : com-  
880 ponente diseñado para medir con alta precisión las energías de electrones y fotones,  
881 está construido a partir de cristales de plomo tungstato ( $PbWO_4$ ). Este es un ma-  
882 terial extremadamente denso pero ópticamente transparente, ideal para detener  
883 partículas de alta energía, este material está hecho principalmente de metal y es  
884 más pesado que el acero inoxidable, pero con un toque de oxígeno en esta forma  
885 cristalina es muy transparente y centellea cuando los electrones y fotones lo atra-  
886 viesen, lo que produce luz en proporción a la energía de la partícula. Para mayor  
887 precisión espacial, el **ECAL** también contiene detectores de “preshower” que se en-  
888 cuentran frente a las tapas finales, permitiendo distinguir entre fotones individuales  
889 de alta energía (a menudo signos de física emocionante) y los pares cercanos menos  
890 interesantes de fotones de baja energía. Está calibrado para discriminar entre de  
891 piones y fotones.
- 892 - **El calorímetro de hadrones o HCAL**(Hadronic CALorimeter) : mide la ener-  
893 gía de los hadrones, además, proporciona una medición indirecta de la presencia  
894 de partículas no cargadas que no interactúan, como los neutrinos. Consta de ca-  
895 pas de material denso (latón o acero) intercaladas con baldosas de centelleadores de  
896 plástico, leídas a través de fibras que cambian la longitud de onda mediante fotodi-  
897 odos híbridos, de esta forma se permite la máxima cantidad de material absorbente  
898 dentro de la bobina magnética.
- 899 - **Solenoide supercondutor (Superconducting Solenoid)**: es el dispositivo cen-  
900 tral alrededor del cual se construye el experimento, con un campo magnético de 4  
901 Tesla permite determinar la relación carga/masa de partículas a partir de la pista  
902 curva que siguen en el campo magnético. Tiene 13 m de largo y 6 m de diámetro,  
903 y sus bobinas de niobio-titanio superconductoras refrigeradas estaban destinadas  
904 originalmente a producir un campo magnético de hasta 4 T. Es componente tie-  
905 ne la función de doblar los caminos de las partículas que emergen de colisiones,

906 permitiendo determinar con la trayectoria curvada por el campo magnético el im-  
907 pulso, combinado con mediciones de posición de alta precisión en los rastreadores  
908 y detectores de muones, esto permite una alta medición en sus resultados.

909 - **Los detectores de muones** : dedicado a la detección de muones, siendo estas  
910 partículas cargadas y 200 veces más masivas que los electrones y positrones, se  
911 espera que se produzcan en la descomposición de una serie de posibles partículas  
912 nuevas. Debido a que los muones pueden penetrar varios metros de hierro sin inter-  
913 actuar, ninguno de los calorímetros de **CMS** los detiene. Por lo tanto, las cámaras  
914 para detectar muones se colocan en el borde mismo del experimento, donde son las  
915 únicas partículas que pueden registrar una señal. Para identificar muones y medir  
916 sus momentos, **CMS** utiliza tres tipos de detectores:

- 917 • **Tubos de deriva o DT(Drift Tubes)** : se usan para mediciones de trayectoria  
918 precisas en la región central del barril.
- 919 • **Cámaras de banda catódica o CSC(Cathode Strip Chambers)** : se usan  
920 para mediciones de trayectoria precisas en los extremos del barril.
- 921 • **Cámaras de placas resistivas o RPC(Resistive Plate Chambers)** : pro-  
922 porcionan una señal rápida cuando un muón pasa a través del detector.

### 923 2.2.1. Identificación y Reconstrucción de Muones.

924 La identificación de partículas es parte del proceso de análisis y estudio en el **LHC**,  
925 para hacer eficiente el proceso de detección, algoritmos y nuevos conceptos tuvieron que  
926 definidos e implementados para un aprovechamiento del equipamiento, con la intención  
927 de maximizar las observaciones válidas de las partículas que se estudian, en especial la  
928 identificación de procesos en los que intervienen los muones sigue siendo uno de los ob-  
929jetivos del proyecto por lo que se hace necesario analizar parte del proceso de identificación  
930 y reconstrucción de muones.

#### 931 Reconstrucción de muones.

932 La reconstrucción de muones es un algoritmo sistemático que se ejecuta en un soft-  
933ware de reconstrucción que utiliza información de impacto para rechazar objetos físicos,  
934 muones. La reconstrucción de muones se realiza en el rastreador de silicio y el sistema  
935 de muones, y se compone de tres pasos secuenciales: reconstrucción local, reconstrucción  
936 independiente y reconstrucción global.

937 La reconstrucción local utiliza la información del golpe recopilada por el sistema muon  
938 para construir pistas; entonces, la información de la pista, como entrada, se alimenta al  
939 algoritmo de reconstrucción independiente. La reconstrucción global utiliza no solo infor-  
940mación de reconstrucción independiente, sino también golpes de seguimiento de silicio. La  
941 reconstrucción del muón coincide con el camino del muón desde el sistema de muones al  
942 rastreador de silicio. La reconstrucción independiente se llama reconstrucción de Level-2

943 y la reconstrucción global se llama reconstrucción de Level-3. Los muones reconstrui-  
 944 dos por reconstrucción independiente y global se denominan, respectivamente, muones  
 945 independientes y muones globales.

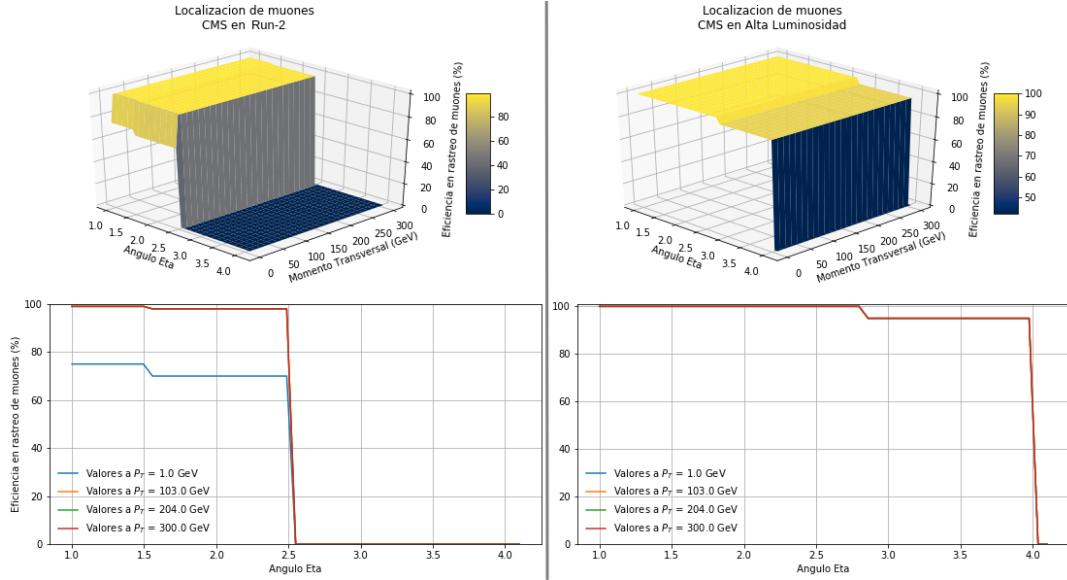


Figura 2-4: Probabilidad de localización de los muones en condiciones de Run-2 y HL.

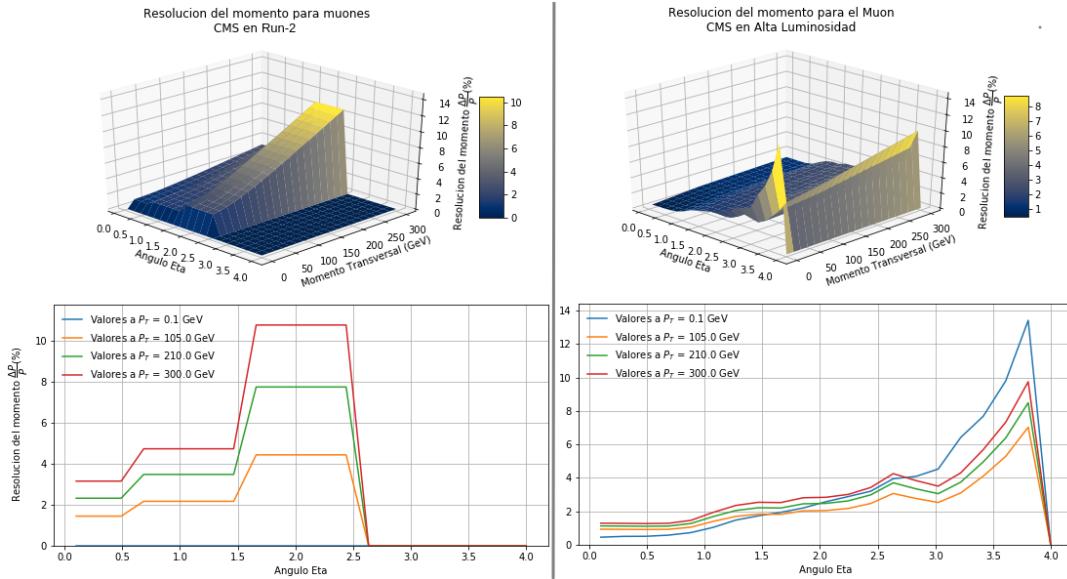


Figura 2-5: Resolución del momento de los muones en condiciones de Run-2 y HL.

946 En la Fig. 2-4 se puede observar como aumenta la capacidad del experimento **CMS** pa-  
 947 ra diferentes condiciones del experimento, en esta se evidencia el aumento de la detección  
 948 de los muones con valores de  $\eta > 2.4$ , esto es parte del proceso de actualización a Al-  
 949 tama Luminosidad. Además la resolución de los valores de momento reconstruidos de los

950 muones en las condiciones actuales del experimento y en las previstas de alta luminosidad  
951 se puede ver en la Fig. 2-5, es clara la disminución del error para la región común  
952 ( $0 < \eta < 2.4$ ).

953 **Identificación de muones.**

954 La “D0 muon ID” es un algoritmo utilizado para seleccionar candidatos a muones  
955 y es un algoritmo complementario para la reconstrucción estándar. A diferencia de la  
956 reconstrucción estándar, utiliza información de energía adicional de **ECAL** y **HCAL**,  
957 y está al revés en términos de información del detector. Muon Identification primero  
958 reconstruye las pistas de los rastreadores de silicio y luego utiliza la información de la  
959 **ECAL** y la **HCAL**.

960 También se consideran los rastreadores que no están asociados con ningún rastro de  
961 muones independiente, lo que le permite reconstruir algunos muones de  $p_T$  bajos sin  
962 suficiente energía para alcanzar el sistema muónico. Estos bajos  $p_T$  muones pueden  
963 no ser reconstruidos como muones globales, pero son identificados por el algoritmo de  
964 identificación de muones. Los muones reconstruidos por el algoritmo de identificación se  
965 denominan muones rastreados (“tracker muons”).

966 **Aislamiento de muones.**

967 Los muones producidos a partir de objetos pesados como  $Z$  y  $W$  deben aislarse de  
968 los muones producidos a partir del decaimiento  $b$  o  $c$ , el aislamiento de muones (“muon  
969 isolation”) tiene como objetivo separar estos diferentes muones, lográndose esta separa-  
970 ción calculando la energía transversal total  $E_T$  depositada en un calorímetro dentro de  
971 un cono a lo largo de la dirección del muón.

972 **Eficiencia Muon.**

973 Las secciones anteriores describen brevemente cada parte del experimento **CMS** desde  
974 la vía interna, más cercana a la línea del haz, hasta el sistema de muones más externo.  
975 Muchos análisis físicos requieren la probabilidad de que un muón se reconstruya como un  
976 objeto muón, dado que el muón se produce en un evento. En general, esa probabilidad  
977 se llama eficiencia. La eficiencia es la relación entre el número de muones que pasan los  
978 criterios deseados y el número total de muones producidos, también puede definirse como:

$$\epsilon_\mu = \epsilon_{track} \cdot \epsilon_{id} \cdot \epsilon_{iso} \cdot \epsilon_{trig} \quad (2-4)$$

979 donde  $\epsilon_{track}$  es la eficiencia del rastreador muón, es decir, la probabilidad de que un muón  
980 producido en un evento también se reconstruya como un rastreador de silicio, rastreador  
981 muón.  $\epsilon_{id}$  es la eficiencia de identificación del muón, la probabilidad de que un muón  
982 pase por un grupo de criterios de selección, dado que es un muón reconstruido.  $\epsilon_{iso}$  es  
983 la eficiencia de aislamiento del muón, la probabilidad de que un muón reconstruido esté  
984 aislado.  $\epsilon_{trig}$  es la eficiencia del disparador, la probabilidad de que un muón reconstruido

985 y aislado se dispare en términos de un umbral de  $p_T$  dado.

986 La eficiencia del muón depende de dos factores principales: la estructura del **CMS** y  
987 el momento transversal  $p_T$  de los muones. La eficiencia del muón está influenciada por  
988 la ruta a través de la cual pasa un detector, porque el detector no es homogéneo, por lo  
989 tanto, la pseudoapidez  $|\eta|$  y el ángulo azimutal  $\varphi$  desempeñan un papel en la decisión  
990 de la eficiencia del muón. Como el detector es muy simétrico con respecto a  $\varphi$  no influye  
991 significativamente en la eficiencia del muón. La  $p_T$  de los muones decide si tienen suficiente  
992 energía para llegar al sistema muónico, debido a que los muones independientes necesitan  
993 más de una estación para ser alcanzados en el sistema muónico, los muones con bajo  $p_T$   
994 no pueden reconstruirse como muones independientes. Toda esta información es resumida  
995 en los paquetes *\*.tcl* de Delphes, aunque solo de forma básica ya que se busca descripción  
996 general del sistema.

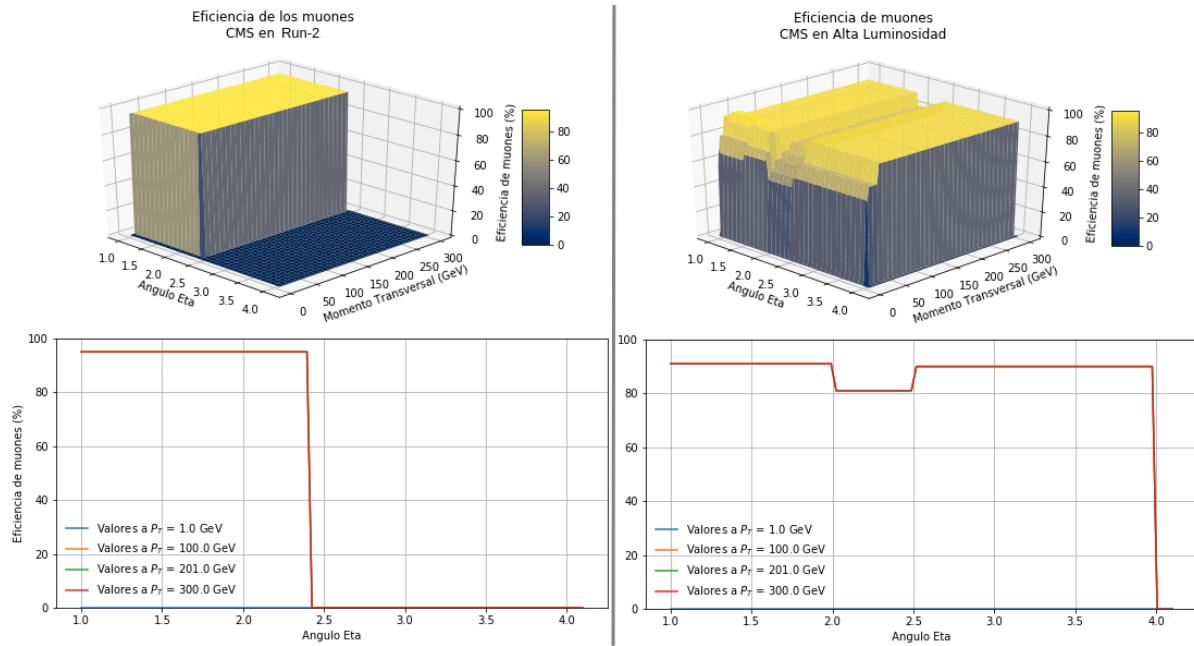


Figura 2-6: Eficiencia de reconstrucción de los muones en condiciones de Run-2 y HL.

997 Como se puede observar en la Fig. 2-6 se extiende como es esperado la eficiencia para  
998 valores de  $\eta > 2.4$  en la configuración de Alta Luminosidad, esto como resultado de la  
999 actualización pánificada por el proyecto.

### 1000 2.3. Simulación en Altas Energías.

1001 Gracias a la infraestructura desarrollada dentro del experimento **ATLAS** y el **CERN**,  
1002 los equipos de análisis de física de altas energías ahora pueden preservar fácilmente su  
1003 código de análisis en formatos de contenedores linux, de modo que pueda usarse con fines  
1004 de reinterpretación, con ellos viene incluido como una receta, el orden exacto en que las

1005 diversas tareas de un análisis deben llevarse a cabo y el conocimiento de cómo usarlo  
1006 exactamente para poder extraer nueva ciencia.

1007 Entre las herramientas más básicas y robusta de la biblioteca desarrollada por el  
1008 **CERN** es el programa orientado a objetos **ROOT**, este fue originalmente diseñado  
1009 para el análisis de datos de física de partículas y contiene varias características específicas  
1010 de este campo. Este proporciona todas las funcionalidades necesarias para manejar el pro-  
1011 cesamiento de grandes datos, el análisis estadístico, la visualización y el almacenamiento.  
1012 Está escrito principalmente en *C ++* pero integrado con otros lenguajes como Python  
1013 y R, es la base también de muchos de sus sistemas, conteniendo las librerías necesarias  
1014 para su ejecución.

1015 El proyecto **RECAST** (**R**equest **E**fficiency **C**omputation for **A**lternative **S**ignal **T**heories)  
1016 combina la motivación científica para un poderoso programa de reinterpretación en  
1017 el **LHC** con las capacidades técnicas que ofrecen los lenguajes de flujo de trabajo y los  
1018 entornos de software preservables. Los principales grupos de búsqueda dentro de la colab-  
1019 oración **LHC** ahora requieren que se conserven nuevos análisis utilizando estas nuevas  
1020 herramientas, de modo que cuando los teóricos proponen un nuevo modelo de física, la co-  
1021 laboración puede reutilizar estos análisis archivados para derivar una primera evaluación  
1022 a través de la reinterpretación. También se espera que los análisis conservados se usen en  
1023 una ola de estudios de resumen planificados una vez que se finalicen los análisis de datos  
1024 de la segunda ejecución del **LHC**, entre ellos los modelos supersimétricos, denominado  
1025 **MSSM** fenomenológico y de esta forma permitir una evaluación detallada del estado de  
1026 la supersimetría más allá del alcance más estrecho de los modelos individuales.

### 1027 2.3.1. Implementando **ROOT**.

1028 Como ya se trato anteriormente **ROOT** es un “framework” para el procesamiento de  
1029 datos, nacido en el **CERN**, dedicado principalmente para la investigación sobre física de  
1030 altas energías. Todos los días, miles de físicos utilizan aplicaciones **ROOT** para analizar  
1031 sus datos o realizar simulaciones, entre sus utilidades encontramos:

1032 - **Guardar datos** : compactación en forma binaria comprimida en un archivo de  
1033 extensión *\*.root*, siendo archivos autodescriptivos, por lo que facilita obtener infor-  
1034 mación sobre los modelos utilizados para describirlos. Su característica principal es  
1035 ser un contenedor de datos llamado árbol, con sus subestructuras ramas (“branch”)  
1036 y hojas (“leave”). Un árbol puede verse como una ventana deslizante a los datos sin  
1037 procesar, tal como se almacenan en un archivo. Los datos de la siguiente entrada en  
1038 el archivo se pueden recuperar avanzando el índice en el árbol. Esto evita los proble-  
1039 mas de asignación de memoria asociados con la creación de objetos y permite que  
1040 el árbol actúe como un contenedor liviano mientras se maneja el almacenamiento  
1041 en búfer de forma invisible.

1042 - **Acceso a los datos**: se accede a los datos guardados en uno o varios archivos  
1043 **ROOT** desde la web o sistemas de entrega de archivos a gran escala. Los árboles

1044        **ROOT** distribuidos en varios archivos se pueden encadenar y acceder como un  
1045        objeto único, lo que permite bucles sobre grandes cantidades de datos.

1046        - **Mina de datos** : posee potentes herramientas matemáticas y estadísticas para  
1047        operar con sus datos, todo sobre *C++*, preparado para el procesamiento en pa-  
1048        ralelo cuando se requiera la manipulación de los mismos. Permite la generación de  
1049        cualquier distribución estadística y modelados, logrando simular sistemas comple-  
1050        jos.

1051        - **Gráfica resultados:** los datos se pueden mostrar con histogramas, diagramas de  
1052        dispersión, funciones de ajuste ya integradas como herramientas en su biblioteca.

1053        - **Ejecución interactiva o creación de aplicaciones:** Puede usar el intérprete  
1054        Cling *C++* para sus sesiones interactivas y para escribir macros, o puede compilar  
1055        su programa para que se ejecute a toda velocidad, siempre dando la posibilidad de  
1056        crear una interfaz gráfica de usuario.

1057        - **Página del Proyecto :** <https://root.cern.ch/>.

1058        . Hay muchas herramientas creadas a partir de **ROOT**, entre ellas se pueden destacar el  
1059        generador de Monte-Carlo Madgraph, y entre las herramientas interactivas a **EVE**.

### 1060        2.3.2. Altas Energías con MadGraph.

1061        Las colisiones de alta energía entre partículas elementales normalmente dan lugar a  
1062        estados finales complejos, con grandes multiplicidades de hadrones, leptones, fotones y  
1063        neutrinos. La relación entre estos estados finales y la descripción física subyacente no es  
1064        simple, por dos razones principales:

- 1065        - No se posee una comprensión completa de la física a implementar.  
1066        - Cualquier enfoque analítico se vuelve intratable por las grandes multiplicidades.

1067        La forma de abordar este problemática es generando eventos completos por los méto-  
1068        dos de **MC**, la complejidad se domina mediante una subdivisión del problema completo  
1069        en un conjunto de tareas separadas más simples, simulando todos los aspectos principales  
1070        de los eventos: selección de procesos duros, la radiación de estado inicial y final, los restos  
1071        de haces, la fragmentación, las desintegraciones, el cálculo de secciones transversales y su  
1072        coincidencia con generadores de eventos, etc. Esto resulta en eventos que deben ser direc-  
1073        tamente comparables con los observables experimentalmente y de esta forma programas  
1074        pueden usarse para extraer la física de las comparaciones con los datos existentes, o para  
1075        estudiar la física en experimentos futuristas.

1076        Con el objetivo de refundir un análisis **LHC** siendo una de sus herramientas mas  
1077        importantes desarrollada por el proyecto y la solución a los problemas anteriormente  
1078        planteado tenemos a MadGraph5\_aMC@NLO (ver referencia Alwall *et al.* [2014]) siendo  
1079        un framework que tiene como objetivo proporcionar todos los elementos necesarios para la

1080 fenomenología del **SM** y extensiones, permitiendo el uso de una variedad de herramientas  
1081 relevantes para generación, manipulación y análisis de eventos.

1082 La salida del mismo son archivos *\*.lhe* o **LHEF** (Les Houches Event File), estos da-  
1083 tos son los que obtenemos de un generador **MC**(Monte Carlos) como MadGraph. Esta  
1084 salida contiene varios parámetros cinemáticos de todas las partículas involucradas en los  
1085 procesos junto con la descripción de procesos simulados, parámetros de modelo y condi-  
1086 ciones de ejecución. El análisis con **LHEF** se realiza para comprender varias propiedades  
1087 cinemáticas básicas de la muestra de **MC** producida. Las variables cinemáticas asociadas  
1088 con diferentes partículas del evento se pueden obtener utilizando este método.

1089 El principal conjunto de herramientas que componen la herramienta MadGraph5\_-  
1090 aMC@NLO, o a las que puede ser integrada son: Delphes (de Favereau *et al.* [2014a]),  
1091 MadAnalysis4 y MadAnalysis5 (Conte *et al.* [2013]), ExRootAnalysis, Golem95 (Binoth  
1092 *et al.* [2008]), QCDLoop (Ellis y Zanderighi [2008]), maddm (Wang [2018]), maddump  
1093 (Buonocore *et al.* [2019]), pythia8 (Sjöstrand *et al.* [2015a]), lhapdf5 y lhapdf6 (Buckley  
1094 *et al.* [2015]), collier (Denner *et al.* [2017]), hepmc, mg5amc\_py8\_interface (Sjöstrand  
1095 *et al.* [2015a]), ninja (Hirschi y Peraro [2016]; Peraro [2014]; Mastrolia *et al.* [2012]),  
1096 oneloop (van Hameren [2011]). Su implementación se hace necesaria para estudios de  
1097 partículas, dada su versatilidad, aunque sea una herramienta de altas exigencias en co-  
1098 nocimiento de programación y trabajo en el sistema Linux.

1099 Para uso futuro como parte de esta investigación se profundizará en las herramientas  
1100 Pythia8 y Delphes, estás a pesar de poderse ejecutar de forma independiente pueden ser  
1101 integradas con facilidad dentro del programa de Madgraph y de esta manera planificar  
1102 la receta de nuestro proceso a reconstruir.

### 1103 2.3.3. Hadronizacion con Pythia 8.

1104 El programa Pythia (descripción en referencia Sjöstrand *et al.* [2015b]) es una herra-  
1105 mienta estándar para la generación de colisiones de alta energía con mas de 35 años de  
1106 desarrollo y actualización, este comprende un conjunto coherente de modelos físicos para  
1107 la evolución de un proceso difícil de pocos cuerpos a un estado final multihadrónico com-  
1108 plejo. Contiene una biblioteca de procesos y modelos complejos para los estados inicial  
1109 y final del *parton showers* (ver referencia Nagy y Soper [2018]), múltiples interacciones  
1110 de *parton-parton*, *beam remnants*, *tring fragmentation* y *article decays*. También tiene un  
1111 conjunto de utilidades e interfaces para programas externos.

1112 Si bien las versiones anteriores se escribieron en Fortran, Pythia 8 representa una  
1113 reescritura completa en *C ++*. Su versión mas actual es una opción atractiva para los  
1114 estudios de física del **LHC** pero el programa también se utiliza para una multitud de  
1115 otros estudios fenomenológicos o experimentales.

1116 Las principales tareas realizadas por el programa incluyen la exploración de las conse-  
1117 cuencias experimentales de los modelos teóricos, el desarrollo de estrategias de búsqueda,  
1118 la interpretación de datos experimentales y el estudio del rendimiento del detector. De  
1119 este modo, abarca toda la vida útil de un experimento, desde los primeros conceptos de

1120 diseño para el detector hasta la presentación final de los datos.

## 1121 Limitaciones

1122 Los modelos de física incorporados en Pythia se centran en colisiones de partículas de  
1123 alta energía que tienen energías de centro de masa (**CM**) mayores de 10 GeV, correspon-  
1124 dientes a una energía de haz fijo de protón-protón (pp) de  $\geq 50 \text{ GeV}$ . Esta limitación se  
1125 debe a la aproximación de un continuo de estados finales permitidos que se utilizan en  
1126 varios lugares de Pythia, especialmente para los cálculos de la sección transversal hadron-  
1127 hadron, total y diferencial, y como base para el modelo de fragmentación de cuerdas. Con  
1128 energías inferiores a 10 GeV, ingresamos a la región de resonancia hadrónica, donde estas  
1129 aproximaciones se rompen, y por lo tanto los resultados producidos por Pythia no se-  
1130 rían confiables. El límite de 10 GeV se elige como una escala típica; para la aniquilación  
1131 positrón-electrón ( $e+ e-$ ) sería posible ir algo más bajo, mientras que para las colisiones  
1132 pp los modelos no son particularmente confiables cerca del límite inferior.

1133 En el extremo opuesto, solo conocemos pruebas explícitas de la física de Pythia que  
1134 modela hasta energías **CM** de aproximadamente 100 TeV, que corresponde a una energía  
1135 de haz de objetivo fijo de  $pp \leq 10^{10} \text{ GeV}$ .

1136 El programa solo funciona con colisiones hadron-hadron o lepton-lepton, las instalacio-  
1137 nes internas para manejar las colisiones protón-núcleo o núcleo-núcleo no están previstas  
1138 en absoluto. Entre los hadrones incluidos se encuentra el (anti)protón, (anti)neutrón, el  
1139 pión y, como caso especial, el Pomeron. Todavía no hay ninguna disposición para las  
1140 colisiones de leptones-hadrones o para los haces de fotones entrantes.

1141 La producción de partículas salientes es en vacío y la simulación de la interacción de las  
1142 partículas producidas con el material detector no está incluida en Pythia. Las interfaces  
1143 con los códigos de simulación de detectores externos pueden ser escritas directamente por  
1144 el usuario o realizadas a través de la interfaz HepMC.

## 1145 Procesos incluidos

1146 Una gran cantidad de procesos están disponibles internamente, y aún más a través  
1147 de interfaces para programas externos. Las adiciones internas recientes incluyen varios  
1148 escenarios para la física de Hidden Valley, procesos adicionales que involucran dimensiones  
1149 adicionales, más procesos supersimétricos (**SUSY**), manejo extendido de R-hadrones y  
1150 más estados de charmonium y bottomonium. En la correspondiente última versión 8.2,  
1151 los siguientes procesos están disponibles internamente:

- 1152 - **Los procesos de Electroweak (EW)** : incluyen la producción rápida de fotones,  
1153 la producción individual de  $\gamma^*/Z$  y  $W^\pm$ , así como la producción de pares de bosones  
1154 débiles con correlaciones de fermiones completas para  $VV \rightarrow 4f$ , además de los  
1155 procesos de colisión de fotones del tipo  $\gamma\gamma \rightarrow ff$ .
- 1156 - **Producción de fermiones de cuarta generación** : a través de interacciones  
1157 electro-débiles o fuertes.

- **Los procesos de Higgs** : incluyen la producción del bosón Higgs del modelo estándar (**ME**), así como los múltiples bosones Higgs de un modelo genérico de dos dobletes de Higgs (**2HDM**). También es posible modificar la correlación angular del decaimiento de Higgs  $h \rightarrow VV \rightarrow 4f$  debido a acoplamientos anómalos de  $hVV$ . La implementación interna de SUSY también utiliza la implementación *2HDM* para su sector Higgs.
- **Los procesos SUSY** : incluyen la producción de pares de partículas **SUSY**, así como la producción resonante de squarks a través de la paridad  $R$  que viola la interacción **UDD**. Las interferencias electro débil se han tenido en cuenta cuando sean relevantes. Se puede hacer que tanto los squarks como los gluinos formen R-hadrones de larga vida, que posteriormente se descomponen. En el medio, es posible cambiar el contenido de sabor ordinario de los hadrones R, mediante interacciones (implementadas por el usuario) con el material del detector.
- **Los procesos de calibre de bosones** : se incluyen la producción de un  $Z'$  (con interferencia completa de  $\gamma^*/Z/Z'$ ), un  $W'^\pm$  y un bosón de calibre de acoplamiento horizontal (entre generaciones)  $R^0$ .
- **Otros Procesos** : Los procesos QCD, procesos simétricos de izquierda a derecha, producción de leptoquark, procesos de composición, procesos de Hidden Valley, procesos extradimensionales, producción Top, Onia.

### **2.3.4. Simulando el detector con Delphes 3.**

Este simula la respuesta de un detector compuesto por un rastreador interno (The silicon Tracker), calorímetros electromagnéticos y de hadrones (**ECAL** y **HCAL**) y un sistema detector de muones (ver referencia de Favereau *et al.* [2014b]). Todos están organizados concéntricamente con una simetría cilíndrica alrededor del eje del haz. El usuario puede especificar el volumen activo del detector, la segmentación del calorímetro y la intensidad del campo magnético uniforme (Fig. 2-7). Cada subdetector tiene una respuesta específica, como se describe a continuación.

En Delphes, la reconstrucción e identificación de objetos se basa en una serie de aproximaciones para acelerar sensiblemente el procedimiento y mantener una buena precisión.

Los muones que se origina en la interacción, tiene cierta probabilidad de ser reconstituido, según la parametrización de eficiencia definida por el usuario. Esta probabilidad se desvanece fuera de la aceptación del rastreador, y para momentos de muón por debajo de algún umbral para rechazar partículas en bucle. El momento final del muón se obtiene mediante una mancha gaussiana del vector inicial de 4 momentos. La resolución es parametrizada en función de  $p_T$  y  $\eta$  implementada por el usuario.

El framework Delphes permite el acceso a datos de diferentes formatos de archivo (**ProMC**, **HEPMC**, **STDHEP** y **LHEF**). Los archivos de eventos provenientes de generadores externos **MC** son procesados primero por un lector, este convierte partículas estables en una colección de objetos universales, para luego ser procesada por una serie de

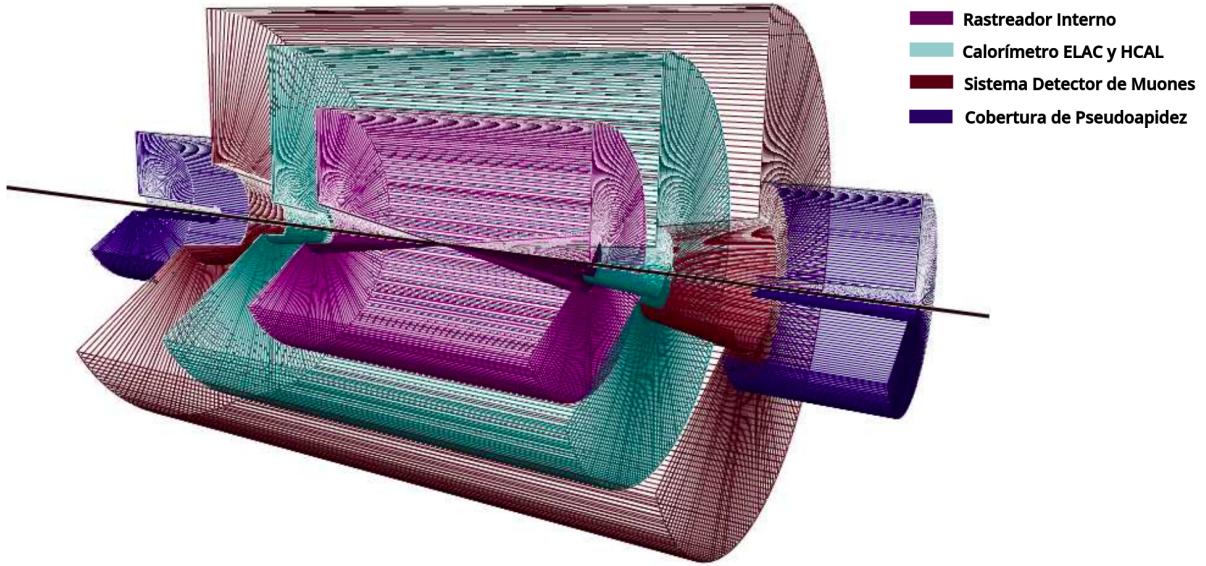


Figura 2-7: Perfil de diseño básico de la geometría del detector genérico asumido en Delphes. Adaptado de artículo de origen Alwall *et al.* [2014].

1197 módulos que comienzan con el módulo de fusión acumulada y terminan con el módulo de  
 1198 buscador de objetos único. Finalmente, Delphes permite al usuario almacenar y analizar  
 1199 eventos en un formato de árbol raíz al ejecutar DelphesHepMC tomando un archivo  
 1200 de configuración `delphes_card.tcl` y realizando la simulación del detector en el archivo  
 1201 `*.hepmc`. La información sobre varios objetos **MC** (partículas) y objetos reconstruidos  
 1202 (jets, partículas reconstruidas), estas se guardan en un archivo `*.root` en forma de árboles  
 1203 (“trees”) Delphes, el archivo de salida `*.root` se puede abrir usando el mismo programa  
**ROOT**.

“La discrepancia entre lo que se esperaba y lo que se ha observado ha aumentado a lo largo de los años, y nos estamos esforzando cada vez más por llenar el vacío.”

*Jeremiah P. Ostriker*

## 1205 Capítulo 3

# 1206 Simulación y Análisis de Resultados.

1207 En este capítulo se presentan todos los proyectos de simulación, tratamiento y análisis  
1208 necesarios para cumplir con el objetivo de esta investigación, estos son programados en  
1209 python y C++, la explicación de estas herramientas darán las bases para profundizar en  
1210 los resultados obtenidos y su respectiva discusión.

### 1211 3.1. Herramientas de caracterización.

1212 Para poder cumplir con los objetivos planteados hace falta una secuencia lógica de  
1213 trabajo, la forma más general de abordar los objetivos planteados se observa en el dia-  
1214 grama de la Fig. 3-1. Primeramente se procede a la generación de la información relativa  
1215 a los eventos de interés bajo diferentes condiciones de generación, esta simulación debe  
1216 ser suficientemente flexible sin perder la eficiencia en el proceso.

1217 Los resultados anteriormente referidos estarán en un formato típicamente inadecuado  
1218 para realizar un estudio en particular, esto consecuencia del gran tamaño de los archivos  
1219 obtenidos, y la alta dispersión de la información relevante a la investigación, de aquí que  
1220 la reconstrucción de la información de los eventos requeridos en archivos de formato de  
datos jerárquico h5 permitiendo una mayor rapidez en el acceso.

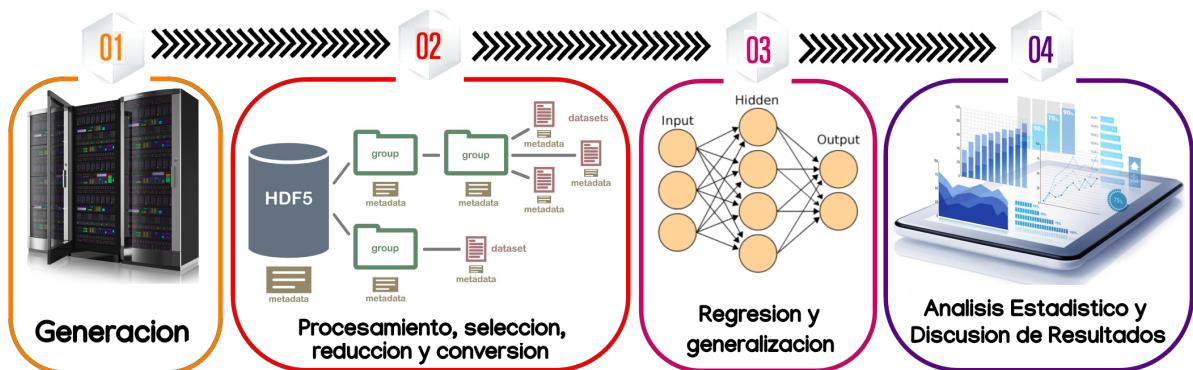


Figura 3-1: Secuencia lógica del análisis del proyecto.

1221 La información recopilada debe ser debidamente procesada, dada las limitantes tecnológico  
1222 s a las que se tiene acceso, de tal forma, que permita la reconstrucción de resultados  
1223 en condiciones cercanas a las ya conocidas, existen en el ámbito científico varios métodos  
1224 para abordar esta problemática uno de los más sencillo es el hacer uso de herramientas de  
1225 regresión y tratamiento de datos con redes neuronales, este forma parte del tercer grupo  
1226 de herramientas desarrolladas. Finalmente se procederá al desarrollo de las herramientas  
1227 para realizar el análisis estadístico característico de la física del proceso al que se le está  
1228 estudiando, su interpretación y discusión es la intencionalidad final del trabajo.

### 1229 **3.1.1. Generación de los datos.**

1230 Los procesos de simulación de física de altas energías posee muchas desventajas, entre  
1231 ellas están los altos requerimientos computacionales para generar las simulaciones y para  
1232 guardar los resultados, por lo que se hace necesario para la investigación el uso de poderosas  
1233 supercomputadoras como el **ACARUS**(Área de Cómputo de Alto Rendimiento de  
1234 la Universidad de Sonora), recurso dedicado a la investigación de los cuerpos académicos  
1235 de la universidad.

#### 1236 **Configuración e implementación de recursos en ACARUS.**

1237 El recurso a usar es el cluster `ocotillo.acarus.uson.mx` con un IP 148.225.111.  
1238 150, este debe ser debidamente configurado con las herramientas necesarias para el pro-  
1239 ceso de generación. Se hace necesario una sección autorizada en el servidor, y seguir  
1240 los pasos de conexión específicados en el portal del proyecto [http://acarus.uson.mx/](http://acarus.uson.mx/clusters/guia.htm)  
1241 `clusters/guia.htm`, todo el trabajo se realiza por medio de una terminal, cuestión que  
1242 imposibilita el uso del recurso sin conocimientos previos de Linux.

1243 Los programas **ROOT** (sección 2.3.1), **Madgraph** (sección 2.3.2), **Delphes** (sección  
1244 2.3.4) y **pythia8** (sección 2.3.3) deben ser integradas debidamente para correr de forma  
1245 seriada, el procedimiento de instalación y configuración se pueden encontrar en <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/MadgraphTutorial>.

#### 1247 **Gestión de recursos con Slurm.**

1248 Además el sistema gestiona el uso de los recursos entre sus usuarios mediante un sis-  
1249 tema de gestión de tareas y de clústeres **Slurm** (Simple Linux Utility for Resources  
1250 Management). Esta herramienta posibilita asignar a los usuarios acceso a nodos de  
1251 cómputo durante un tiempo determinado, proporciona un framework que permite ini-  
1252 ciar, ejecutar y supervisar el trabajo y además se encarga de arbitrar la necesidad de  
1253 recursos, administrando una cola de tareas pendiente. La documentación relativa al  
1254 uso de esta herramienta se puede encontrar en el enlace de sus desarrolladores <https://slurm.schedmd.com/documentation.html>. Para el caso que nos ocupa en nuestra  
1255 investigación, para poder paralelizar el proyecto de generación desarrollado en python se  
1256 prepara un fichero (script) con los datos del trabajo a ejecutar y el modo de utilizar de

1258 los recursos requeridos, el usado en este proyecto contiene la siguiente configuración:

```
#SBATCH -nodes=4          # Maximo numero de nodos para asignarse
#SBATCH -ntasks-per-node=8 # Maximo numero de tareas en cada nodo
#SBATCH -ntasks=40         # Maximo numero de tareas totales
#SBATCH -distribution=cyclic:cyclic # Modo de distribucion de tareas
#SBATCH -mem-per-tasks=1000   # Memoria asignada por tarea
#SBATCH -mail-type=END       # Momento de notificacion
#1259 #SBATCH -mail-user=xxx@gmail.com # Correo a notificar
#SBATCH -job-name=DarkSUSY   # Nombre del trabajo
#SBATCH -time=168:0:0        # Tiempo maximo de ejecucion
#SBATCH -partition=general   # Nombre de la particion
#SBATCH -constraint=broadwell
srun python genera_v5.py
```

1260

1261 El código anterior gestiona los recursos del crúster para que se ejecute en paralelo el  
1262 programa generador `genera_v5.py` siendo este el desarrollado para generar las muestras  
1263 que se precisan para la investigación.

#### 1264 Proyecto de python generador.

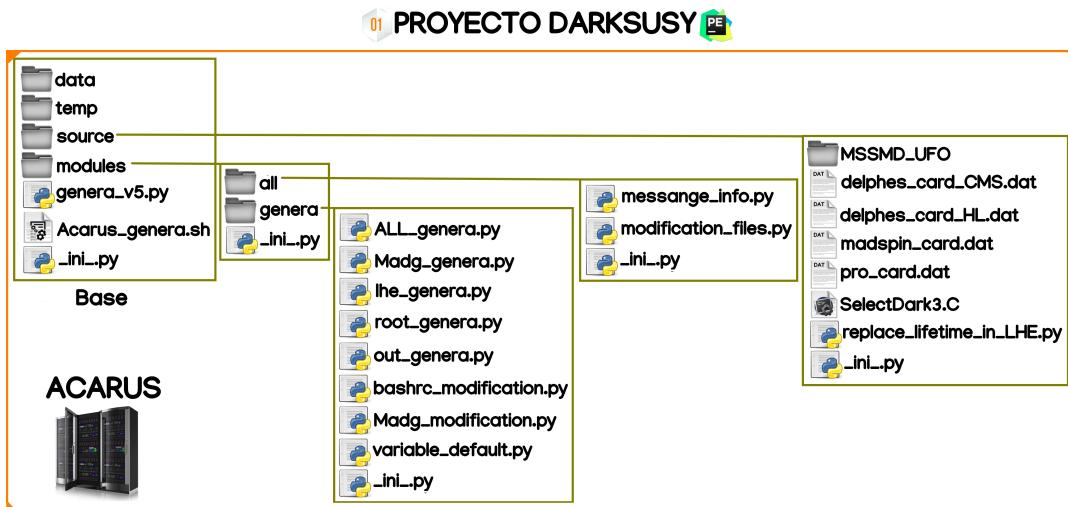


Figura 3-2: Estructura del proyecto de generación. Página del proyecto <https://github.com/franky8939/GeneradorDarkSUSY>

1265 Ante la necesidad de flexibilizar la generación de eventos de decaimiento caracterís-  
1266 ticos de la Fig. 1-6 se crea un proyecto de programación con la capacidad de generar  
1267 eventos en Madgraph bajo la variación de las masas de las partículas  $n_1$  (neutralino lige-  
1268 ro, también referido como NeuL),  $n_D$  (neutralino oscuro, también referido como NeuD) y  
1269  $\gamma_D$  (fotón oscuro, también referido como PhoD) y del tiempo de vida del último (TcPhoD),  
1270 además de generar la simulación bajo condiciones del detector en Run-2 (referenciada  
1271 en el trabajo como CMS) y High Luminosity (referenciada como HL). La estructura del

1272 proyecto se puede observar en la Fig. 3-2.

1273 Además para hacer uso eficiente de los recursos puestos a disposición, el proyecto  
1274 creado en **python**, fue programado con la intencionalidad de automatizar la configuración  
1275 necesarias para su correcta ejecución, automatizando el cambio de los parámetros de  
1276 generación posteriormente definidos, inclusión del modelo **MSSMD** dentro de Madgraph  
1277 y guardado automático de los resultados en un archivo externo predefinido, el flujo general  
1278 del programa se puede observar en la Fig. 3-3.

1279 El elemento iniciador se encuentra en la función **genera\_v5.py** versión 5, con este  
1280 se incluye una descripción de opciones que hacen que sea adaptable ante situaciones  
1281 alternativas a su configuración original:

```
genera_v5.py [-h] [-Event EVENT] [-MNeuD MNEUD] [-MNeuD MNEUD]
               [-MPhoD MPHOD] [-TcPhoD TCPHOD] [-Mode MODE]
1282               [-Card CARD] [-Name NAME] [-Dir_Madg DIR_MADG]
               [-Dir_temp_Madg DIR_TEMP_MADG]
               [-Dir_Source DIR_SOURCE] [-Dir_Out DIR_OUT]
```

optional arguments:

-h, -help	Show this help message and exit
-Event EVENT	Number of Event
-MNeuD MNEUD	Mass of the Dark Neutralino
-MNeul MNEUL	Mass of the Lightest Neutralino
-MPhoD MPHOD	Mass of the Dark Photon
-TcPhoD TCPHOD	Life time of the Dark Photon
-Mode MODE	Condition using "in" or "out"
-Card CARD	Card using "CMS" or "HL"
-Name NAME	Name of root file out
-Dir_Madg DIR_MADG	Directory of Madgraph
-Dir_temp_Madg DIR_TEMP_MADG	Directory of temporal install Madgraph
-Dir_Source DIR_SOURCE	Directory where source stay
-Dir_Out DIR_OUT	Directory of result

1284 En el directorio base (Fig. 3-2) la carpeta **data** es donde se guardarán los resultados  
1285 de la simulación, esta puede modificarse con la variable **-Dir\_Out**, lo mismo ocurre con  
1286 las otras variables relacionadas con directorios. Además se permite numerosas entradas  
1287 de posibles variables de los elementos de masa y tiempo de vida en forma de vectores, el  
1288 programa se adaptará a todas las posibles combinaciones incluidas.

1289 Es importante tener en cuenta que los archivos de monte carlo generados por Mad-  
1290 Graph con extensión **\*.lhe** se generan para diferentes condiciones de masa (**MNeuL**, **MNeuD**  
1291 y **MPhoD**), cuando es requerido, en estos se adaptada el tiempo de vida del fotón os-  
1292 curo **TcPhoD** con la función **replace\_lifetime\_in\_LHE.py**, continuando con la imple-  
1293 mentación de la herramienta de hadronización **pythia8** y por el simulador del detec-  
1294 tor **Delphes**, este último bajo las dos condiciones de configuración requeridas (Run-  
1295 2 y Alta Luminosidad), de esta forma la estadística de comparación en la investiga-

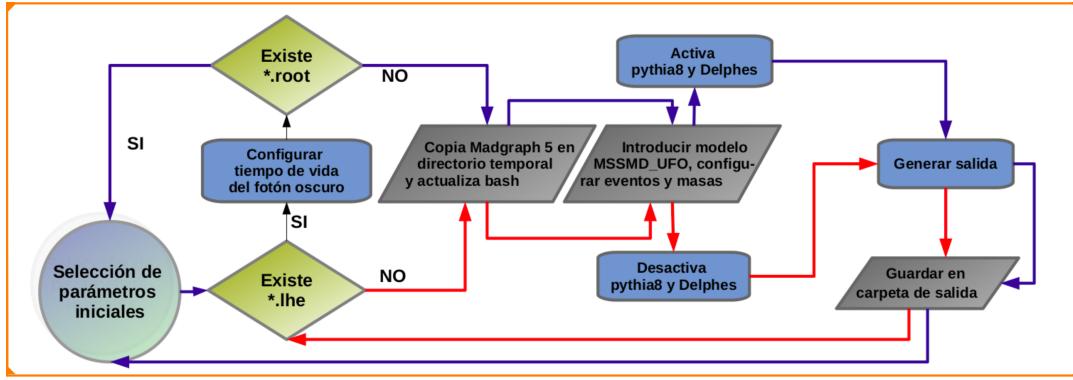


Figura 3-3: Diagrama de flujo de programación del proyecto de generación.

1296 ción se puede enfocar en las variaciones de las reconstrucciones del detector desechan-  
 1297 do el error por cambios de las condiciones iniciales dadas por el método **MC**. Por  
 1298 defecto y por motivos de exploración básica se definen variables inicializadoras en el  
 1299 archivo **variable\_default.py**, estas se volverán las muestras de esta investigación:

```

MNeuL = [10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]
Card = ["CMS", "HL"]
MNeuD = [.25, 1, 2, 3, 4, 5, 10]
MPhoD = [.25, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]
TcPhoD = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100]
Event = 10000
  
```

1300 1301 Como se puede observar el valor predeterminado de generación **Event** es relativamente  
 1302 bajo para los requerimientos de una investigación riburiosa, pero será suficiente por cuando  
 1303 es por motivo de exploración, el tamaño de los archivos de muestras es de  $\sim 800$  MB,  
 1304 además por una cuestión de espacio la información de los eventos para valores de **Ma\_LNeu**  
 1305  $> 10$  se reduce para aquellos poseedores de mínimo 4 muones. La base de datos generada  
 1306 para propósitos de esta investigación es de  $\sim 2$  Terasbyte.

1307 1308 Para hacer referencia a los eventos definimos  $\mathbb{E}_i^{(j, k)} = 1$  donde  $i = \{1, \dots, i_{max}\}$   
 1309 corresponde al elemento del evento requerido,  $j = \{0\mu, 1\mu, 2\mu, 3\mu, 4\mu, \dots\}$  hace refe-  
 1310 rencia al contenido muónico de la información por evento y  $k = \{\text{CMS}, \text{HL}\}$  referencia al  
 detector que generó los datos, de esta notación podemos derivar que:

$$\mathbb{E}^{(j, \text{ CMS})} = \sum_i \mathbb{E}_i^{(j, \text{ CMS})}, \quad \mathbb{E}_i^{(\text{ CMS})} = \sum_j \mathbb{E}_i^{(j, \text{ CMS})} \quad y \quad \mathbb{E}^{(\text{ CMS})} = \sum_{ij} \mathbb{E}_i^{(j, \text{ CMS})} \quad (3-1)$$

$$1311 \quad \mathbb{E}^{(j, \text{ HL})} = \sum_i \mathbb{E}_i^{(j, \text{ HL})}, \quad \mathbb{E}_i^{(\text{ HL})} = \sum_j \mathbb{E}_i^{(j, \text{ HL})} \quad y \quad \mathbb{E}^{(\text{ HL})} = \sum_{ij} \mathbb{E}_i^{(j, \text{ HL})} \quad (3-2)$$

1312 1313 De forma general tenemos que cada evento generado depende de las tres masas anterior-  
 mente referidas y del tiempo de vida del fotón oscuro:

$$\mathbb{E}_i^{(j, k)} \equiv \mathbb{E}_i^{(j, k)}(\text{MNeuL}, \text{MNeuD}, \text{MPhoD}, \text{TcPhoD}) \quad (3-3)$$

1314 Esta notación será la utilizada cuando se haga referencia a la información en la base de  
1315 datos.

### 1316 3.1.2. Procesamiento y conversión de los datos.

1317 Para poder realizar los estudios requeridos se hace necesario acceder a la información  
1318 contenida en los archivos `*.root` de forma eficiente, la descripción del contenido del árbol  
1319 de datos de nuestros archivos se puede observar en el enlace <https://cp3.irmp.ucl.ac.be/projects/delphes/wiki/WorkBook/RootTreeDescription>. Pero se hace necesario  
1320 un interpretador externo al entorno predeterminado de **ROOT** para poder acceder a la  
1321 información pertinente a la investigación, de aquí que se programe una clase en python que  
1322 permita de forma cómoda extraer información para adaptarla según las necesidades que  
1323 puedan surgir (se hace uso de las paquetes `pyroot`). Esta clase (ver Fig. 3-4) además  
1324 de permitir acceder a los datos, procesa la información para hacer la reconstrucción más  
1325 probable de la masa del fotón oscuro partiendo de la información muónica, el diagrama  
1326 de la figura muestra el procedimiento utilizado.

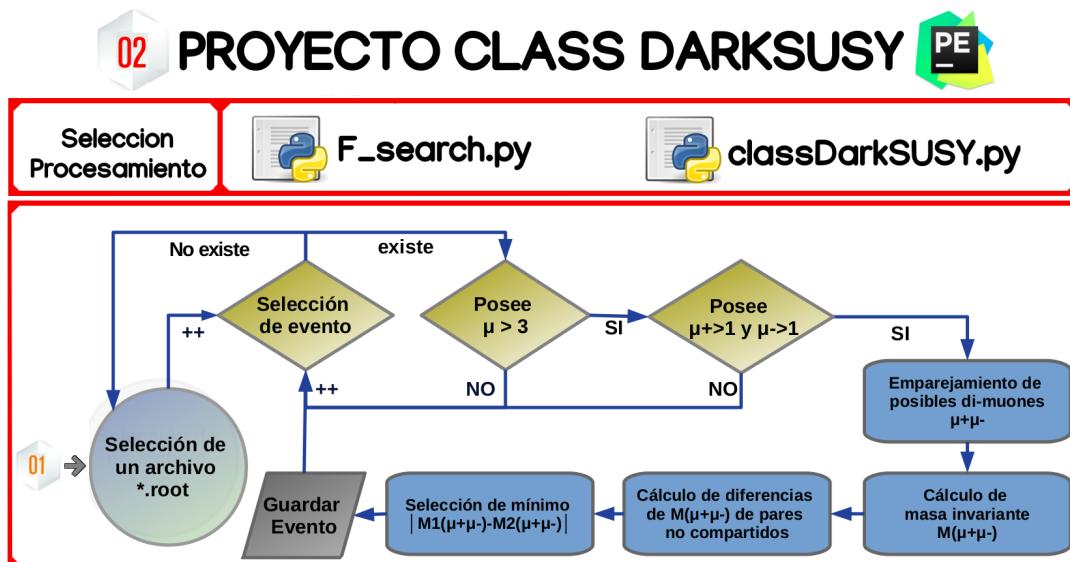


Figura 3-4: Estructura del proyecto interpretador de la información contenida en los archivos `*.root`. Página del proyecto <https://github.com/franky8939/DarkSUSY/blob/master/modules/darkSUSY/classDarkSUSY.py>

1328 Dada la gran cantidad de información y archivos a procesar para el análisis estadístico  
1329 incluso ante un acceso eficiente, la gran dispersión de la información hace que los procesos  
1330 de recolección de datos sea lento y con altos requerimientos de memoria, la forma en que  
1331 se abordó esta dificultad fue incorporar la información solicitada en un mismo archivo de  
1332 tipo **HDF5** (**Hierarchical Data Format**) la cual posee una librería de propósito general  
1333 con un formato de ficheros para el almacenamiento de datos científicos.

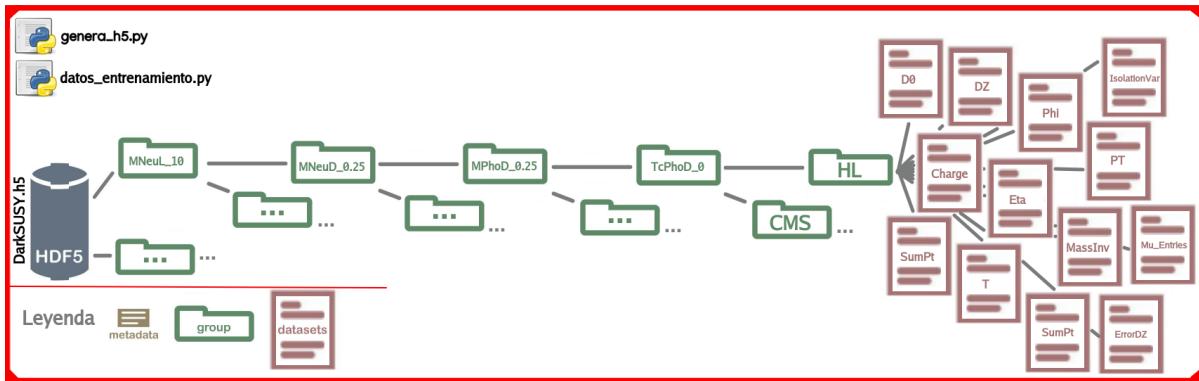


Figura 3-5: Estructura de los metadatos con la información filtrada. Pagina del proyecto [https://github.com/frankyy8939/DarkSUSY/blob/master/00-Convertidores/genera\\_h5.py](https://github.com/frankyy8939/DarkSUSY/blob/master/00-Convertidores/genera_h5.py)

Este formato de datos **HDF5** fue creado para atender las necesidades de científicos e ingenieros que trabajan en entornos de computación de altas prestaciones que requieran un uso intensivo de datos, de aquí que este predeterminado para que sea muy eficiente en el almacenamiento y el acceso.

### 3.1.3. Métodos de regresión de datos.

Ante la necesidad de investigar las relaciones entre diferentes variables cuantitativas los análisis de regresión son una herramienta de frecuente uso en estadística, dado que simula un proceso o modelo que analiza este vínculo entre una variable dependiente y una o varias variables independientes.

Una de las principales aplicaciones del análisis de regresión es la proyección con diferentes escenarios, teniendo en cuenta el grado de correlación sobre la variable dependiente y de esta manera construir una función que permita estimar el valor la variable de estudio. Ejemplos de implementación en python se pueden visualizar en el enlace <https://www.aprendemachinelearning.com/regresion-lineal-en-espanol-con-python/>.

#### Forma analítica.

La foma general analítica de una regresión no lineal tiene la forma matemática:

$$Y = f(X) + \epsilon \quad (3-4)$$

donde:

$Y$  y  $X$  valores de salida y entrada multidimensionales.

$\epsilon$  parámetro multidimensional correspondiente a los residuos.

$f$  función de correlación.

Algunos problemas de regresión no lineal deben linealizarse mediante una transformación en la formulación del modelo, en el caso que nos ocupa en esta investigación esta será la

1354 manera de solucionar el hecho de que los datos correspondiente a la imagen son valores  
1355 no negativos ( $Y > 0$ ) ya que son referidos a frecuencias resultado de la aplicación de  
1356 métodos estadísticos sobre alguna propiedad de nuestro conjunto de datos. De lo cual  
1357 tenemos:

$$\ln y = f(X) + \epsilon \quad (3-5)$$

1358 En el caso particular de esta investigación siempre la salida o imagen  $y$  será referida a  
1359 una variable simple y la forma de la función de entre  $f$  será una polinomial, quedando  
1360 entonces:

$$\ln y = \sum_{i=0}^k (\alpha_{0i} + \alpha_{1i} \cdot x_i + \alpha_{2i} \cdot x_i^2 + \alpha_{3i} \cdot x_i^3 + \dots + \alpha_{ni} \cdot x_i^n) + \epsilon \quad (3-6)$$

1361 el orden de la regresión está dado por  $n$  y los valores  $x_i$  serán las variables independientes  
1362 de nuestro modelo, estos fueron integrados en una función en python implementando la  
1363 paquetería `sklearn` con la flexibilidad de cambiar los valores  $k$  y  $n$ .

#### 1364 **Redes neuronales.**

1365 Las **RNA** son una estructura compuesta de un número de unidades interconectadas  
1366 (neuronas artificiales), cada unidad posee una característica entrada/salida e implemen-  
1367 ta una computación local o función, la salida de cualquier unidad esta determinada, su  
1368 interconexión con otras unidades, y posiblemente de sus unidades internas. La red desa-  
1369 rrolla usualmente una funcionalidad por lo general a través de una o mas formas, por  
1370 lo tanto es un arreglo masivo de elementos de procesamiento simple llamados neuronas,  
1371 los cuales poseen un alto grado de interconectividad entre sus elementos, en los que la  
1372 información puede fluir en cascada potenciando su capacidad para aproximar funciones,  
1373 clasificar patrones y aumenta su inmunidad frente al ruido.

1374 La función desarrollada para el uso en esta investigación utiliza la paquetería de `keras`  
1375 y permite la flexibilidad de cambiar la cantidad de  $k$  capas ocultas y los nodos  $m_k$  que  
1376 posee cada una de ellas.

1377 También se permite cambiar la dimensión de los datos de entrada para que estas  
1378 coincidan con las necesidades futuras, siempre considerando como mínimas entradas las  
1379 condiciones iniciales de generación y una variable extra en el caso de que sea necesario.

#### 1380 **Parámetros de confianza.**

1381 Con el fin de determinar si el modelo es adecuado, se hace necesario utilizar conceptos  
1382 de inferencia estadística tales como intervalos de confianza para los parámetros así como  
1383 pruebas de bondad de ajuste.

1384 El parámetro **RMSE** (Root Mean Square Error) es el error cuadrático medio o raíz  
1385 de la desviación cuadrática media. Este mide la cantidad de error que hay entre dos  
1386 conjuntos de datos, comparando un valor predicho y un valor observado o conocido, la

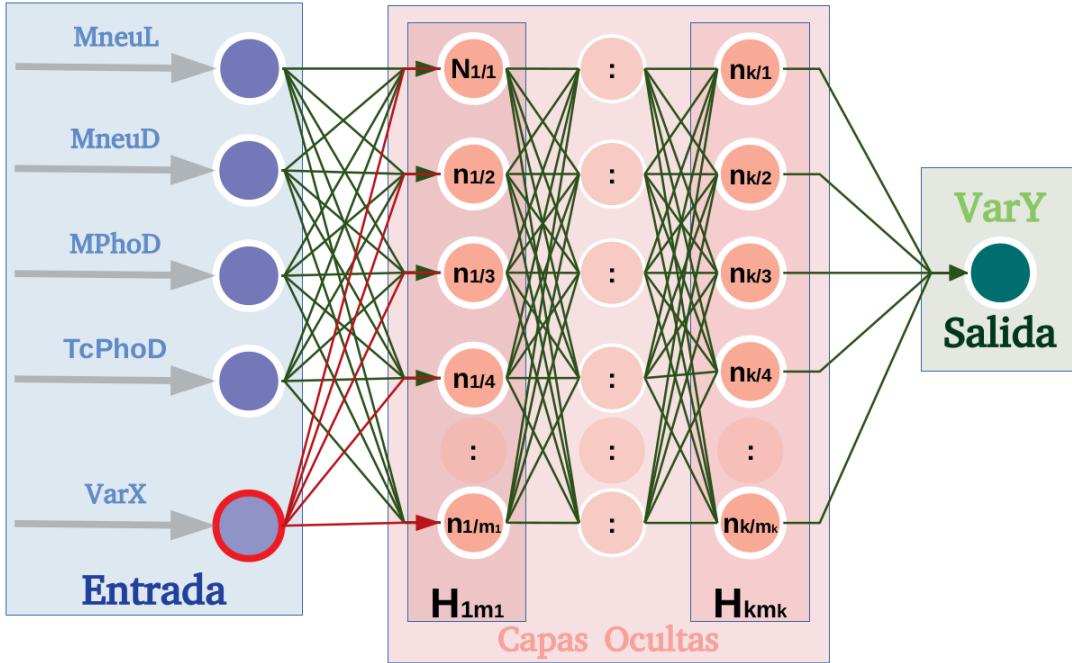


Figura 3-6: Diagrama de la estructura general de la red neuronal.

1387 ecuación que la describe es:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |Y_i^{(sm)} - Y_i^{(real)}|^2}{N}} \quad (3-7)$$

1388 donde  $Y_i^{(sm)}$  es conjunto de datos predichos o simulados y  $Y_i^{(real)}$  se corresponde con el  
1389 conjunto de datos experimentales o observados.

1390 La **RMSE** es siempre no negativa, y un valor de 0 indicaría un ajuste perfecto a los  
1391 datos. Dado que es una raíz cuadrada del promedio de errores cuadrados, este parámetro  
1392 es proporcional al tamaño del error cuadrado; por lo tanto, los errores mayores tienen un  
1393 efecto desproporcionadamente mas grande de aquí que sea sensible a los valores atípicos.

1394 Otra prueba ampliamente utilizada es la prueba de correlación de Pearson o coefi-  
1395 ciente de determinación (**R<sup>2</sup>**), esta se considera una prueba no paramétrica que mide la  
1396 discrepancia entre una distribución observada y otra teórica, indicando en qué medida  
1397 las diferencias existentes entre ambas, una de sus bondades es que es independiente de  
1398 la escala de medida de las variables. La fórmula que da el estadístico es:

$$\mathbf{R^2} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i^{(sm)} Y_i^{(real)}}{\sqrt{(\sum_{i=0}^N Y_i^{(sm)})^2 \cdot (\sum_{i=0}^N Y_i^{(real)})^2}} \quad (3-8)$$

1399 El valor de este índice de correlación varía en el intervalo [-1, 1], indicando el signo el

1400 sentido de la relación:

- 1401 - Si  $R^2 = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependen-  
1402 cia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas  
1403 aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.  
1404 - Si  $0 < R^2 < 1$ , existe una correlación positiva.  
1405 - Si  $R^2 = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las  
1406 variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las  
1407 dos variables.  
1408 - Si  $-1 < R^2 < 0$ , existe una correlación negativa.  
1409 - Si  $R^2 = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una depen-  
1410 dencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas  
1411 aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

## 1412 3.2. Análisis de eventos.

1413 Procesando la información relevante a la investigación se hace necesario identificar  
1414 los eventos a los que se les dedicará el estudio, conocer la frecuencia de la cantidad  
1415 de muones por eventos  $E_i^{(j, k)}$  para los muones reconstruidos por los detectores en las  
1416 configuraciones CMS (correspondiente a Run-2) y HL (Alta Luminosidad) es el primer  
1417 paso en la investigación.

1418 Las Figs. 3-7 muestran los histogramas normalizados de los porcentajes de eventos con  
1419 diferentes contenidos muónicos, estos son comparados ante el cambio de los parámetros  
1420 TcPhoD, MPhoD y MMuonD respectivamente. En estos gráficos se puede observar la alta  
1421 dependencia entre los valores normalizados de  $E_i^{(j, k)}$  sobre los eventos totales (Event= 10 000), y como estos varian con respecto a los parámetros de generación, identificar esta  
1422 dependencia se hace necesaria por motivos de caracterización y generalización.

### 1424 Error en la elección de muestra.

1425 Si consideramos que la forma de estas distribuciones corresponde con una gaussiana,  
1426 el error en la frecuencia es calculable:

$$\frac{\Delta E}{E} = Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{p(1-p)}{E}} \quad (3-9)$$

1427 donde:

1428  $Z_{\frac{\alpha}{2}}$  es un parámetro que depende del nivel de confianza  $(1 - \alpha)$ . Algunos de los  
valores más usados son:  $Z_{0.1} = 1.65$ ,  $Z_{0.05} = 1.96$  y  $Z_{0.01} = 2.58$ .

$p$  es la probabilidad ocurrencia, ya que no se conoce se toma el valor máximo  
posible de  $p_{max} = 0.5$ .

1429 Para realizar los análisis lo más general posible se denota una frecuencia absoluta o

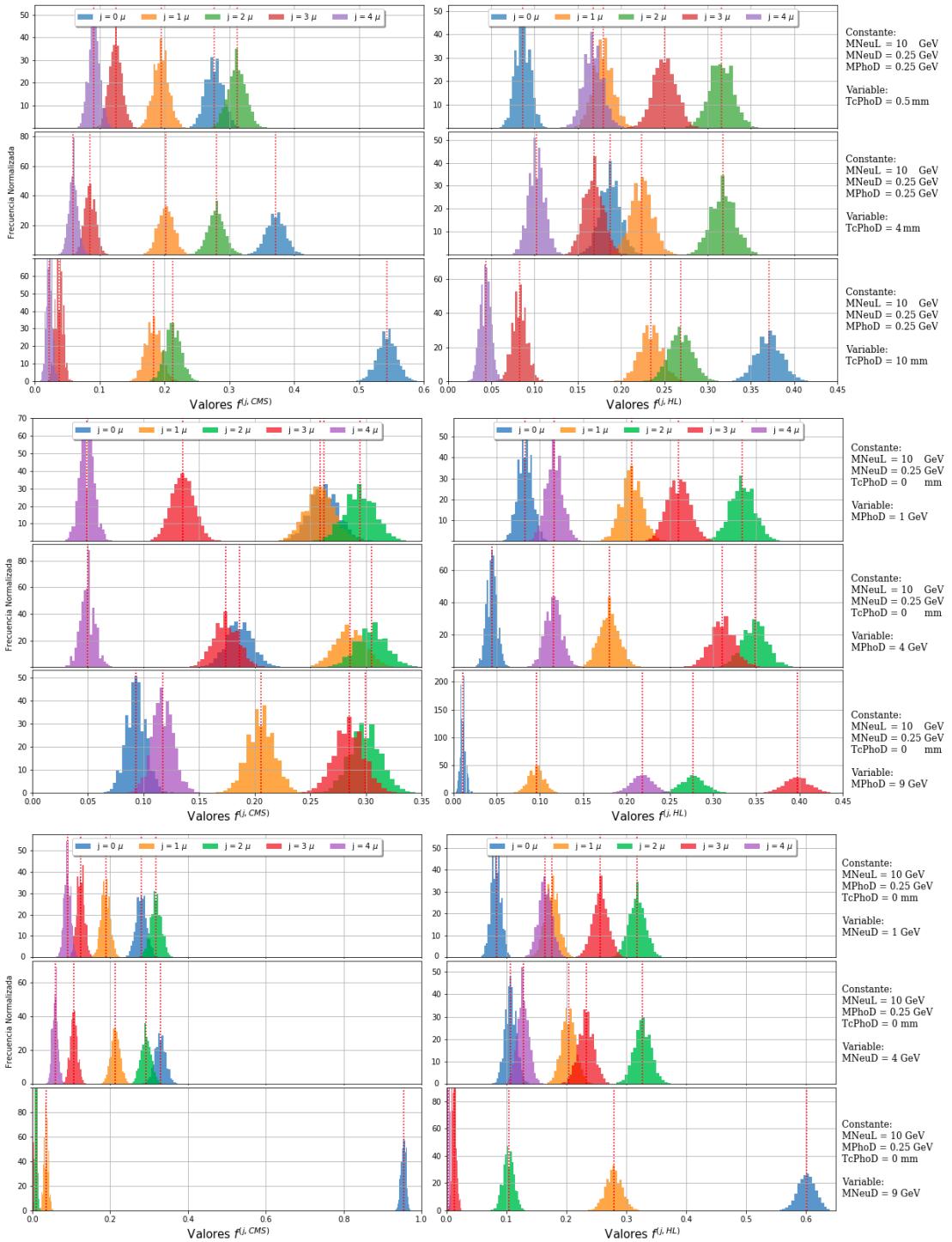


Figura 3-7: Distribuciones de frecuencia de las entradas  $f^{(j,k)}$  ante cambios de  $TcPhoD$ ,  $MPhoD$  y  $MNuL$ .

<sup>1430</sup> porcentual como:

$$f^{(j, k)} = \frac{\mathbb{E}^{(j, k)}}{\mathbb{E}^{(k)}} \quad (3-10)$$

<sup>1431</sup> donde al sustituir en la ec. 3-9, tenemos:

$$\frac{\Delta f^{(j, k)}}{f^{(j, k)}} = Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{p(1-p)}{f^{(j, k)} \cdot \mathbb{E}^{(k)}}} \quad (3-11)$$

### <sup>1432</sup> Probabilidad de ocurrencia.

<sup>1433</sup> Para cierta combinación de parámetros, los detectores en sus diferentes configuraciones tienen una probabilidad  $p$  de ocurrencia o reconstrucción del muón, si se hace la <sup>1434</sup> suposición de que esta probabilidad es fija para cierta morfología en las propiedades de <sup>1435</sup> los muones entonces podemos hacer uso de la binomial para facilitar las comparaciones <sup>1436</sup> entre los eventos. Partiendo de la ecuación binomial:

$$f^{(j, k)} = \frac{n_{max}!}{n_j! (n_{max} - n_j)!} p^{n_j} (1-p)^{n_{max}-n_j} \quad (3-12)$$

<sup>1438</sup> donde:

<sup>1439</sup>  $n_j = j$  número de muones. Para nuestras muestras los valores admisibles son  $j = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ , resultado de lo cual  $n_{max} = n_{4\mu} = 4$ .

<sup>1440</sup>  $p$  es la probabilidad ocurrencia o reconstrucción de los muones.

<sup>1441</sup> Dado que el  $\sim 80\%$  de los datos generados a los que se tiene acceso solo se posee información de los eventos  $\mathbb{E}^{(4\mu, k)}$ , entonces podemos calcular la probabilidad de ocurrencia <sup>1442</sup> como:

$$f^{(4\mu, k)} = \frac{4!}{4! 0!} p^4 (1-p)^0 = p^4 \Rightarrow p = \sqrt[4]{f^{(4\mu, k)}} \quad (3-13)$$

<sup>1443</sup> Finalmente sustituyendo la ec. 3-13 en ec. 3-12 tenemos:

$$f^{(j, k)} = \frac{n_{max}!}{n_j! (n_{max} - n_j)!} (f^{(4\mu, k)})^{\frac{n_j}{4}} (1 - (f^{(4\mu, k)})^{\frac{1}{4}})^{n_{max}-n_j} \quad (3-14)$$

<sup>1444</sup> Con esta ecuación se podrá simular los valores  $f^{(j, k)}$  para los datos con información reducida, aunque dada las suposiciones que derivan de esta ecuación los errores observados <sup>1445</sup> de la comparación con los datos reales pueden llegar a 20%.,

### <sup>1447</sup> Correspondencia entre los eventos de interés y los parámetros de generación.

<sup>1448</sup> Algunos ejemplos de estos resultados de valores de  $f^{(0\mu, k)}$  y  $f^{(4\mu, k)}$  los podremos <sup>1449</sup> observar en la Tabla 3-1 y en los gráficos de la Fig. 3-8. En estos se puede observar <sup>1450</sup> una clara tendencia en la frecuencia de casos  $f^{(j, k)}$ , en general se puede constatar la <sup>1451</sup> disminución de eventos de interés con el aumento del tiempo de vida del fotón (TcPhoD) <sup>1452</sup> y de la masa del neutralino oscuro (MNeuD), en contraste se registra aumento de los

MNeuL (GeV)	MNeuD (GeV)	MPhoD (GeV)	TcPhoD (mm)	$f^{(0\mu, \text{ CMS})}$	$f^{(0\mu, \text{ HL})}$	$f^{(4\mu, \text{ CMS})}$	$f^{(4\mu, \text{ HL})}$
10	0.25	0.25	0.5	$0.2777 \pm 0.0068$	$0.0864 \pm 0.0038$	$0.0920 \pm 0.0040$	$0.1678 \pm 0.0053$
			2	$0.3040 \pm 0.0071$	$0.1227 \pm 0.0045$	$0.0779 \pm 0.0036$	$0.1355 \pm 0.0047$
			4	$0.3718 \pm 0.0078$	$0.1872 \pm 0.0056$	$0.0597 \pm 0.0032$	$0.1024 \pm 0.0041$
			10	$0.5428 \pm 0.0095$	$0.3710 \pm 0.0079$	$0.0227 \pm 0.0019$	$0.0433 \pm 0.0027$
			50	$0.8570 \pm 0.0119$	$0.7568 \pm 0.0112$	$0.0016 \pm 0.0005$	$0.0039 \pm 0.0008$
			100	$0.9217 \pm 0.0123$	$0.8664 \pm 0.0120$	$0.0002 \pm 0.0002$	$0.0006 \pm 0.0003$
10	0.25	2	0	$0.2467 \pm 0.0064$	$0.0699 \pm 0.0034$	$0.0497 \pm 0.0029$	$0.1135 \pm 0.0043$
			4	$0.1862 \pm 0.0055$	$0.0446 \pm 0.0027$	$0.0494 \pm 0.0029$	$0.1157 \pm 0.0040$
			6	$0.1286 \pm 0.0046$	$0.0253 \pm 0.0021$	$0.0599 \pm 0.0032$	$0.1456 \pm 0.0049$
			8	$0.0998 \pm 0.0040$	$0.0134 \pm 0.0015$	$0.0957 \pm 0.0040$	$0.1960 \pm 0.0057$
10	2	0.25	0	$0.2929 \pm 0.0069$	$0.0890 \pm 0.0038$	$0.0852 \pm 0.0038$	$0.1604 \pm 0.0052$
			4	$0.3287 \pm 0.0074$	$0.1072 \pm 0.0042$	$0.0586 \pm 0.0031$	$0.1281 \pm 0.0046$
			6	$0.4265 \pm 0.0084$	$0.1536 \pm 0.0051$	$0.0221 \pm 0.0019$	$0.0831 \pm 0.0037$
			8	$0.7097 \pm 0.0108$	$0.3203 \pm 0.0073$	$0.0022 \pm 0.0006$	$0.0193 \pm 0.0018$
20	1	1	0	—	—	$0.0560 \pm 0.0030$	$0.1176 \pm 0.0044$
			30	—	—	$0.0480 \pm 0.0028$	$0.1224 \pm 0.0045$
			40	—	—	$0.0524 \pm 0.0030$	$0.1319 \pm 0.0047$
			50	—	—	$0.0583 \pm 0.0031$	$0.1391 \pm 0.0048$

Tabla 3-1: Ejemplos de valores de frecuencia muónica para combinaciones de generación

1453 eventos de interés con la masa del fotón oscuro, en el caso de cambios de la masa del  
 1454 neutralino ligero (MNeuL) los datos muestran variaciones pequeñas en el rango definido  
 1455 por lo que la existencia de una tendencia no es posible corroborar en el grupo de datos  
 1456 simulados.

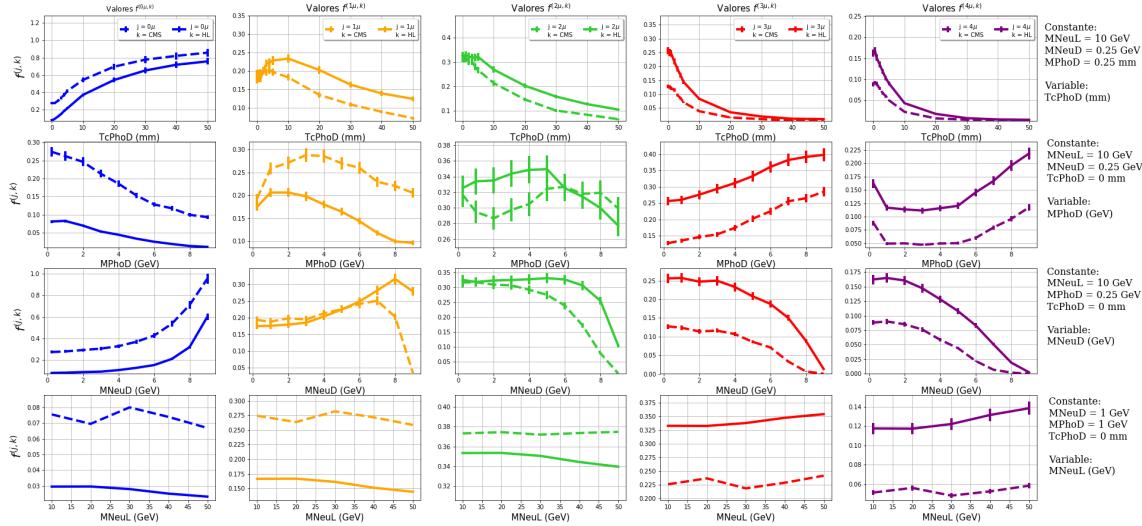


Figura 3-8: Distribuciones de frecuencia de las entradas  $f^{(j, k)}$  ante cambios de MNeuD.

### Regresión de datos de frecuencia $f^{(j, k)}$ .

1458 Con la intención de realizar una caracterización eficiente de la cantidad de eventos de  
 1459 interés y de su dependencia con los parámetros de generación, se intenta utilizar métodos  
 1460 simples de regresión para valorar la posibilidad de inferir información pertinente a la

1461 frecuencia de los eventos. Para esto se utilizan los métodos presentados ya en la sección  
 1462 3.1.3 mediante una aproximación lineal como la propuesta en la ec. 3-6 y con una red  
 1463 neuronal como la presentada en la Fig. 3-6.

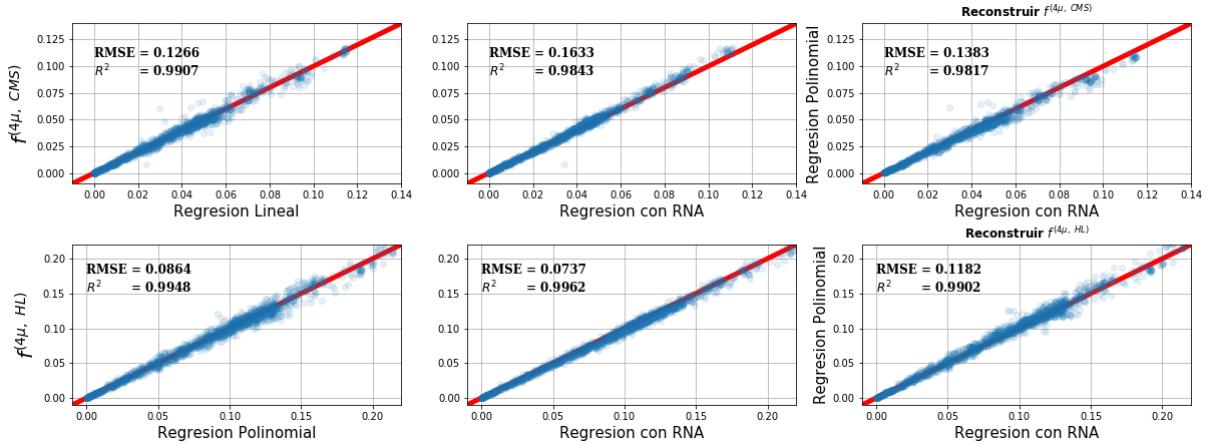


Figura 3-9: Resultados de la regresión de los valores de frecuencia  $f^{(4\mu, k)}$ .

1464 Al implementar el método de regresión polinomial sobre los datos  $f^{(4\mu, CMS)}$  y  $f^{(4\mu, HL)}$   
 1465 considerando como valores independientes  $x_i = \{ \text{MMeul}, \text{MMeuD}, \text{MPhoD}, \text{TcPhoD} \}$  solo has-  
 1466 ta el orden  $k = 6$  se logrará encontrar una correspondencia entre los valores simulados y los  
 1467 predichos, siendo corroborada por los parámetros de confianza **RMSE** y **R<sup>2</sup>** con valores  
 1468 pequeños y cercanos a 1, respectivamente.

1469 Al realizar la regresión de las frecuencias  $f^{(4\mu, k)}$  haciendo uso del método **RNA**  
 1470 según una configuración semejante a la Fig. 3-6 con  $k = 4$  capas ocultas con cantidad  
 1471 de nodos  $m_k = \{9, 7, 5, 3\}$  por cada uno respectivamente, se obtuvo un modelo con  
 1472 valores de **RMSE** y **R<sup>2</sup>** comparables con los del método de regresión lineal explicado  
 1473 con anterioridad.

1474 En la Fig. 3-6 también se puede observar una comparación de los resultados de los  
 1475 dos métodos al intentar reconstruir la información de los valores de frecuencia  $f^{(4\mu, k)}$   
 1476 mostrando una alta linealidad en los resultados obtenidos validando su implementación  
 1477 como método de análisis. Al analizar los errores de estas predicciones con los datos  
 1478 originales se obtuvo que los resultados diferían hasta en un  $\sim 30\%$ , siendo una de las  
 1479 posibles consecuencias de estos altos errores el pequeño valor del parámetro de generación  
 1480 Event (ver sección 3.1.1).

### 1481 3.3. Generalidades de las propiedades independien- 1482 tes de los muones.

1483 La caracterización de las propiedades de los muones es parte importante de este  
 1484 estudio, obtener las dependencias empíricas entre ellas y los posibles cambios en los  
 1485 límites de estas propiedades resultado del cambio de la eficiencia de los detectores en sus

1486 diferentes configuraciones se hace necesario para comprender mejor como se visualiza la  
1487 teoría investigada desde su reconstrucción por los detectores.

1488 Dado la necesidad de hacer referencia a las propiedades de los muones se hará uso de  
1489 la variable  $\chi$ , esta puede ocupar las variables:

1490 -  $\mathbf{P}$ : momento de la partícula, normalmente referenciada por su proyección en direc-  
1491 ción transversal  $\mathbf{PZ} = \mathbf{P} \sin \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo polar, definido como aquel entre  
1492 el vector momento y la dirección positiva del eje Z, normalmente utilizado ya que no  
1493 es invariante frente a transformaciones de Lorentz.

1494 -  $\eta$ : la pseudoapidez (también referida como Eta), esta representa la coordenada  
1495 espacial que describe el ángulo de una partícula en relación con el eje del haz. Su  
1496 ecuación tiene la forma:  
1497

$$\eta = -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (3-15)$$

1498 -  $\phi$ : ángulo azimutal (también referida como Phi).

1499 -  $T$ : tiempo de vida media, esta describe la descomposición de las partículas, se ex-  
1500 presa comúnmente en términos de vida media, constante de descomposición o vida  
1501 media. La probabilidad de descomposición se puede expresar como una función de  
1502 distribución:  
1503

$$W(t) = Ae^{-\lambda t} \quad (3-16)$$

1504 Para normalizar esta función de distribución:

$$\int_0^\infty W(t)dt = \int_0^\infty Ae^{-\lambda t}dt = -\frac{1}{\lambda}Ae^{-\lambda t}\Big|_0^\infty = \frac{A}{\lambda} = 1 \quad (3-17)$$

1505 La probabilidad de que una partícula dada decaiga dentro del tiempo  $t$  viene dada  
1506 por la integral de la función de distribución de descomposición de 0 a  $t$ . Esta no es  
1507 la cantidad que deseamos calcular: queremos el tiempo promedio que la partícula  
1508 existirá sin descomponerse. La probabilidad de que una partícula no se descomponga  
1509 es uno menos la probabilidad de que se descomponga. La probabilidad de que  
1510 una partícula permanezca en el tiempo  $t$  es entonces:

$$P_W(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t'}dt' = 1 + e^{-\lambda t'}\Big|_0^t = e^{-\lambda t} \quad (3-18)$$

1511 El tiempo de supervivencia promedio es entonces el valor medio del tiempo usando  
1512 esta función de probabilidad tenemos.

$$\langle t \rangle = \tau = \int_0^t te^{-\lambda t}dt / \int_0^t e^{-\lambda t}dt = \lambda \int_0^\infty e^{-\lambda t}dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3-19)$$

1513 -  $D_0$ : Parámetro de impacto transversal, se define como la distancia transversal al eje

1514 del haz en el punto de maxima aproximacion, donde su signo esta dado de acuerdo  
1515 al momento angular de la traza alrededor de eje.

- 1516 - DZ: Parámetro de impacto longitudinal, definido como la posicion de la coordenada  
1518  $z$  de la traza en el punto de maximo acercamiento.

1519

1520 Ante la necesidad de hacer estadística con las variables  $\chi$  definimos la frecuencia de  
1521 cada una de estas variables  $\mathbb{F}_\chi^{(k)}(x)$  donde para un valor predefinido de resolución de la  
1522 información  $\delta\chi$

$$\Theta(X, Y) = \begin{cases} 1 & X - \Delta X < Y \text{ and } Y < X + \Delta X \\ 0 & X - \Delta X > Y \text{ or } Y > X + \Delta X \end{cases} \quad (3-20)$$

$$\mathbb{F}_\chi^{(k)}(x) = \sum_{ji} \Theta(\chi_i^{(j,k)}, x) \quad (3-21)$$

$$f_\chi^{(k)}(x) = \mathbb{F}_\chi^{(k)}(x) / \sum_x \mathbb{F}_\chi^{(k)}(x) \quad (3-22)$$

1523 **Momento transversal.**

1524 En los gráficos superiores de la Fig. 3-10 se puede observar los valores de momento  
1525 angular de todos los muones reconstruidos para eventos  $\mathbb{E}_i^{(4\mu, \text{ CMS})}$  (configuración Run-2) y  
1526  $\mathbb{E}_i^{(4\mu, \text{ HL})}$  (configuración en High Luminosity), en estos se puede visualizar las diferencias  
1527 entre los rangos de detección donde para eventos  $k = \text{CMS}$  el  $\sim 99\%$  de los muones poseen  
1528  $\sim 10 < P_t^{(4\mu, \text{ CMS})} < \sim 100$ , en contraste para  $k = \text{HL}$  tenemos  $\sim 0.1 < P_t^{(4\mu, \text{ HL})} < \sim 100$ .  
1529 Este aumento de rango en HL para valores menores de  $\sim 10 \text{ GeV}$  se puede ver que no es  
1530 sin pérdidas, se puede constatar un cambio en la forma de los gráficos, esto es debido a  
1531 que la inclusión de nuevos sensores en la configuración HL no poseen la misma eficiencia  
1532 en la reconstrucción de la información.

1533 **Valores de angulo**

1534 Otro factor importante en la detección de los muones es el valor de Entonces de forma  
1535 generar se puede Además como límite superior se puede constatar que el se encuentran  
1536 para valores

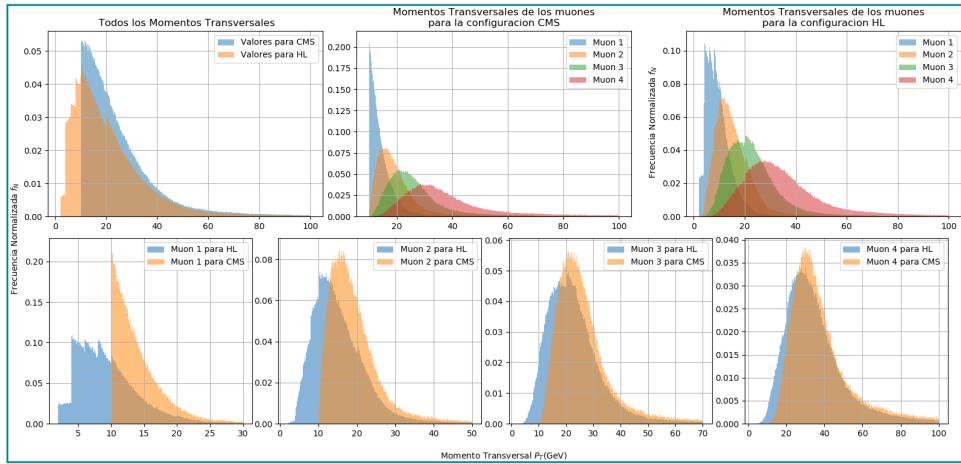


Figura 3-10: Caracterización global de los momentos transversales de nuestra población de muones reconstruidos.

### **3.4. Reconstrucción de los fotones oscuros.**

#### **3.4.1. Reconstrucción de los eventos con 4 muones.**

#### **3.4.2. Reconstrucción de los eventos con menos de 4 muones.**

#### **3.4.3. Reconstrucción total de fotones oscuros.**

### **3.5. Aislamiento.**

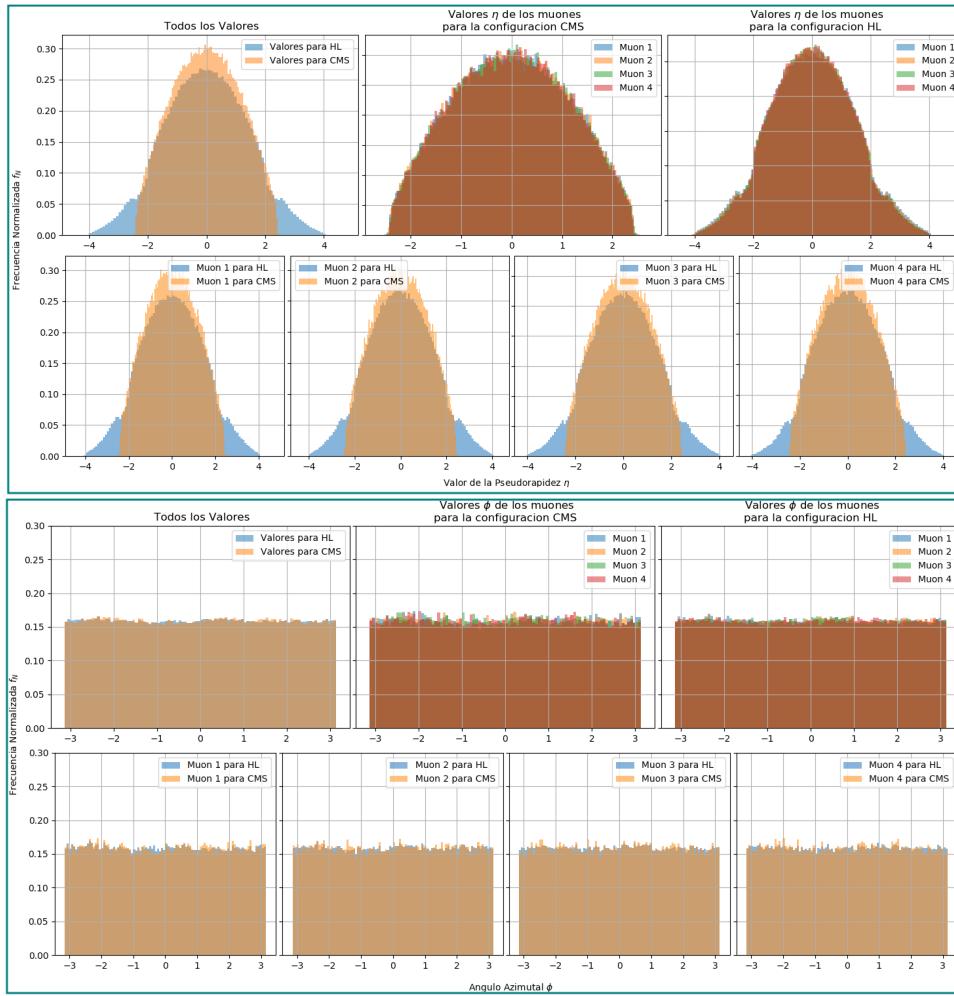


Figura 3-11: Grupo total de datos generados para los eventos de interes.

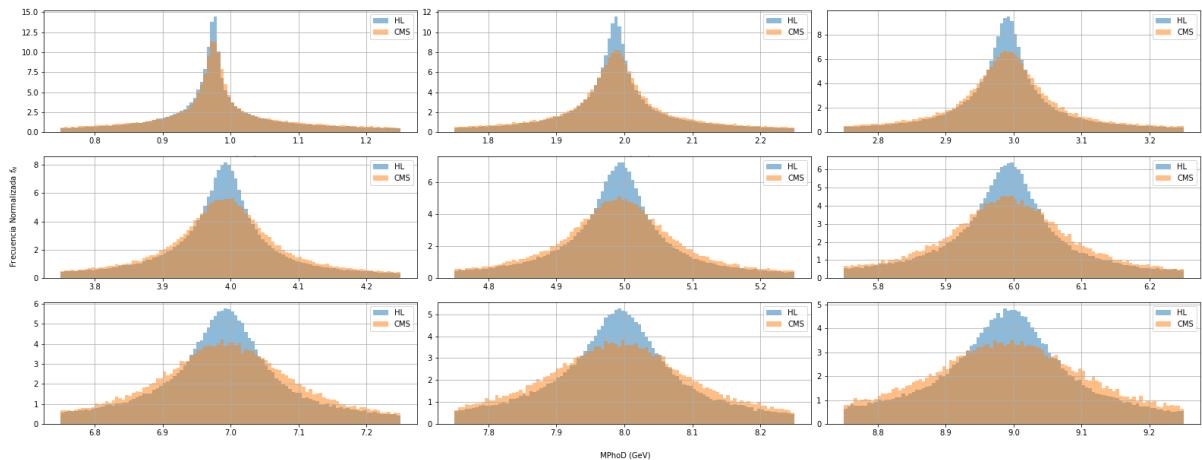


Figura 3-12: .

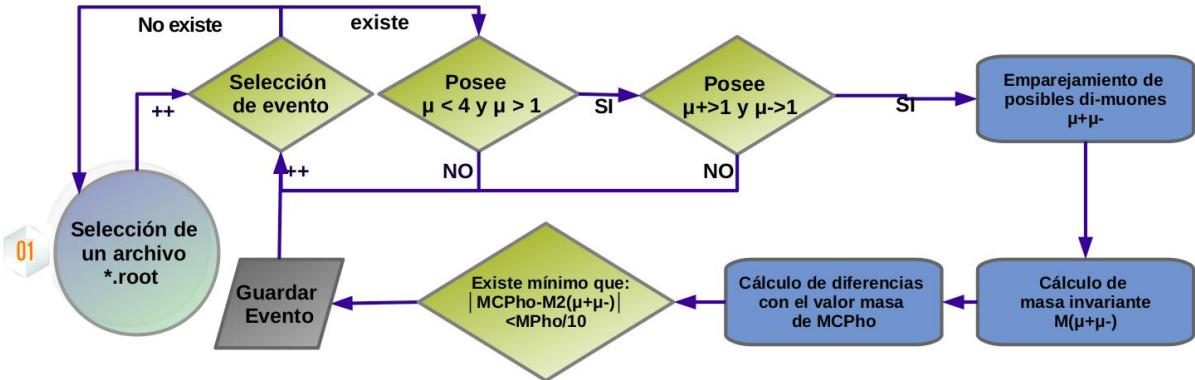


Figura 3-13: Diagrama de flujo de programación para el análisis de los eventos con 3 y dos muones.

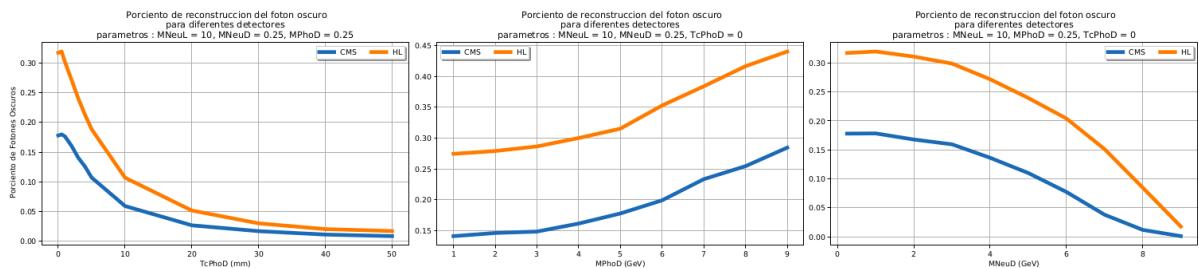


Figura 3-14: Análisis del porcentaje de reconstrucción de los fotones oscuros.

# <sup>1542</sup> Anexo A

<sup>1543</sup> Muchos fenómenos cosmológicos han dado indicios de la existencia de materia oscura  
<sup>1544</sup> en sus diferentes composiciones teóricas, dado por lo cual un gran conjunto de experimentos  
<sup>1545</sup> han sido dedicados únicamente con la intención de obtener información pertinente  
<sup>1546</sup> en la comprensión de su composición y explicación de su comportamiento, existen dos  
<sup>1547</sup> métodos para realizar mediciones dimensionales:

## <sup>1548</sup> Forma directa

<sup>1549</sup> Los métodos de detección directa intentan detectar las esporádicas interacciones que,  
<sup>1550</sup> a su paso por la Tierra, podrían experimentar las partículas de materia oscura con un  
<sup>1551</sup> material adecuado y muy bien aislado del entorno. Algunos experimentos de masa oscura  
<sup>1552</sup> son:

### <sup>1553</sup> - ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) :

- <sup>1554</sup> • **Nombre:** Experimento de Materia Oscura Axion
- <sup>1555</sup> • **Resumen:** Utiliza una cavidad de microondas resonante dentro de un gran imán superconductor para buscar axiones de materia oscura fría en el halo local de materia oscura galáctica.
- <sup>1556</sup> • **Página del proyecto :** <https://depts.washington.edu/admx/publications.shtml#>

### <sup>1560</sup> - ANAIS (Annual modulation with NaI Scintillators) :

- <sup>1561</sup> • **Nombre:** Modulación anual con NaI Centelleador.
- <sup>1562</sup> • **Resumen:** Busca la modulación anual de la señal con centelleadores de *NaI* con el objetivo de detectar directamente la Materia Oscura galáctica a través de su dispersión con los núcleos blanco de un cristal de NaI(Tl) radiopuro. Esta señal de Materia Oscura debería estar modulada anualmente debido al cambio de la velocidad relativa **WIMP**-núcleo, consecuencia de la rotación de la Tierra alrededor del Sol.
- <sup>1563</sup> • **Página del proyecto :** <https://gifna.unizar.es/anais/>.

### <sup>1569</sup> - ArDM (Argon Dark Matter):

- <sup>1570</sup> • **Nombre:** Materia Oscura en el Argón.

- **Resumen:** Busca medir y observando electrones libres de ionización y fotones de centelleo, que son producidos por la interacción de su núcleo con los átomos vecinos y de esta forma relacionarla con la dispersión elástica de **WIMP** de los núcleos de argón líquido del que esta hecho el detector.
  - **Pagina del proyecto :** [https://wikimili.com/en/China\\_Jinping\\_Underground\\_Laboratory](https://wikimili.com/en/China_Jinping_Underground_Laboratory).
- CDMS (Cryogenic Dark Matter Search)
- **Nombre:** Buscando Materia Oscura Criogénica
  - **Resumen:** Busca utilizando una serie de detectores de semiconductores a temperaturas de milikelvin encontrar los límites más sensibles en las interacciones de la materia oscura **WIMP** con materiales terrestres y de esta manera detectar directamente la materia oscura. Constituye una serie de experimentos continuos: el **CDMS I**, **CDMS II**, el **SuperCDMS** y en la actualidad continua con **SuperCDMS SNOLAB**.
  - **Pagina del proyecto :** <https://supercdms.slac.stanford.edu/>
- DAMA/NaI experiment
- **Nombre:** Experimento DAMA/NaI
  - **Resumen:** Características semejantes al experimento **ANALIS** con mas de 7 años de datos de datos recopilados, fue continuado su estudio con el experimento DAMA/LIBRA.
  - **Pagina del proyecto :** <https://people.roma2.infn.it/~dama/web/home.html>
- DarkSide
- **Nombre:** DarkSide
  - **Resumen:** Busca con la construcción y operación de una serie de cámaras de proyección de tiempo o **TPC** (Time Projection Chamber) de argón líquido para detectar **WIMPs**.
  - **Pagina del proyecto :** <http://darkside.lngs.infn.it/>
- DEAP (Dark matter Experiment using Argon Pulse-shape discrimination)
- **Nombre:** Experimento de materia oscura con discriminación de forma de pulso de argón
  - **Resumen:**) Busca discriminación de fondo basada en la característica forma de pulso de centelleo del argón permitiendo medir directamente **WIMP**.
  - **Pagina del proyecto :** <http://deap3600.ca/>
- Otros experimentos :
- **MACRO** (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory),  
**Pagina del proyecto :** [https://hepwww.pp.rl.ac.uk/groups/ukdmc/ukdmc\\_old.html](https://hepwww.pp.rl.ac.uk/groups/ukdmc/ukdmc_old.html)

- PandaX (**P**article and **A**strophysical **X**enon Detector),  
**Página del proyecto :** <https://pandax.sjtu.edu.cn/>
- WARP (WIMP ARgon Programme),  
**Página del proyecto :** <https://ztopics.com/WIMP%20Argon%20Programme/>
- XENON,  
**Página del proyecto :** <http://www.xenon1t.org/>
- ZEPLIN-III dark matter experiment,  
**Página del proyecto :** <https://zeplin.io/>
- UKDMC (UK Dark Matter Collaboration),  
**Página del proyecto :** <https://hepwww.pp.rl.ac.uk/groups/ukdmc/ukdmc.html>

## Forma indirecta

Otro mecanismo de investigación es cuando el valor de la propiedad física se obtiene a partir de lecturas directas de otras propiedades y de una expresión matemática que las relacione. Las medidas indirectas calculan el valor de la medida mediante una expresión matemática fundamentada por la teoría, previo cálculo de las magnitudes que intervienen en la expresión por medidas directas. Algunas investigaciones relacionadas con este mecanismo son:

### - AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer)

- **Nombre:** Espectrómetro Magnético Alfa
- **Resumen:** Busca con un detector localizado en Estación Espacial Internacional o ISS (International Space Station) medir la antimateria en los rayos cósmicos, detectando picos en el flujo de positrones, antiprotones o rayos gamma pudiendo indicar la presencia de neutralinos. El **AMS-01** es referido al prototipo de **AMS**, conteniendo este una versión simplificada del detector usado. Algunos de sus resultados se muestran en las referencias Li *et al.* [2017]; Battiston [2008]
- **Página del proyecto :** <https://ams.nasa.gov/>

### - ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch project)

- **Nombre:** Astronomía con un Proyecto de Investigación Ambiental del Telescopio de Neutrinos y Abyss.
- **Resumen:** Busca con sus tubos fotomultiplicadores detectar la radiación Cherenkov emitida cuando el muón pasa a través del agua, las técnicas de detección utilizadas consiguen en distinguir entre la señal de muones "que van hacia arriba", de neutrinos muónicos que interaccionan antes de llegar por debajo al detector y del alto flujo de muones procedentes de la atmósfera, con los datos y la alta resolución de estos pretende buscar indicaciones de materia oscura detectando el proceso de aniquilación del neutralino en el Sol. El proyecto

1648 **ANTARES** complementa el Observatorio de Neutrinos IceCube en la Antártida.  
1649 Otros telescopios de neutrinos diseñados para su uso en el área cercana incluyen el telescopio griego **NESTOR** y el italiano **NEMO**.

- 1651 • **Pagina del proyecto :** <https://antares.in2p3.fr/>  
1652 <https://icecube.wisc.edu/>  
1653 <https://cds.cern.ch/record/5841>  
1654 <http://nemo.in2p3.fr/nemow3/index.html>

1655 - **CALET (CALorimetric Electron Telescope)**

- 1656 • **Nombre:** Telescopio de electrones calorimétrico
- 1657 • **Resumen:** Busca realizar un seguimiento de la trayectoria de electrones, protones, núcleos y rayos gamma, mediante la medición de su dirección, carga y energía, para esto hace uso de un telescopio espacial de alta precisión.
- 1659 • **Pagina del proyecto :** <https://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/ef/calet/>

1660 - **DAMPE (DArk Matter Particle Explorer)**

- 1661 • **Nombre:** Explorando Particulas de Materia Oscura
- 1662 • **Resumen:** Busca señal de descomposición indirecta de un hipotético candidato de materia oscura **WIMP** mediante la detección rayos gamma de alta energía, electrones e iones de rayos cósmicos, para esto se hace uso de un telescopio espacial localizado en el satélite **CAS**.
- 1664 • **Pagina del proyecto :** <http://dpnc.unige.ch/dampe/>

1665 - **FGST (Fermi Gamma-ray Space Telescope)**

- 1666 • **Nombre:** Telescopio Espacial de Area Grande de Rayos Gamma
- 1667 • **Resumen:** Busca haciendo haciendo uso de un observatorio espacial muestras astronómicas de rayos gamma desde la órbita terrestre baja para estudiar fenómenos astrofísicos y cosmológicos como núcleos galácticos activos, púlsares, otras fuentes de alta energía y materia oscura. Su instrumento principal es el Telescopio de Área Grande o **LAT** (Large Area Telescope), con el cual los astrónomos pretenden realizar un levantamiento de todo el cielo.
- 1669 • **Pagina del proyecto :** <https://glast.sites.stanford.edu/>

1670 - **PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics)**

- 1671 • **Nombre:** Exploración de la Materia-Antimateria y Astrofísica de los Núcleos de Luz.
- 1672 • **Resumen:** Busca estudiar y detectar rayos cósmicos, con un enfoque particular en su componente antimateria, en forma de positrones y antiprotones, además monitorea a largo plazo de la modulación solar de los rayos cósmicos, partículas energéticas del Sol, partículas de alta energía en la magnetosfera de la Tierra y electrones jovianos, con el objetivo de detectar evidencia de aniquilación de materia oscura.
- 1674 • **Pagina del proyecto :** <https://pamela.roma2.infn.it/>

1687 - **MASS** (Matter Antimatter Superconducting Spectrometer)

- 1688 • **Nombre:** Espectrómetro Superconductor de Materia-Antimateria.
- 1689 • **Resumen:** Busca con la adaptación de la configuración básica de la Insta-
- 1690 lación de Imanes en Globo investigar partículas de alta energía usando un
- 1691 espectrómetro de imán superconductor, un dispositivo de tiempo de vuelo, un
- 1692 contador de gas cherenkov y un calorímetro de imagen de tubo streamer, de
- 1693 esta manera medir antiprotones en el rango de energías entre  $4 - 20 \text{ GeV}$  y
- 1694 positrones de aproximadamente  $4 - 10 \text{ GeV}$ . Se utilizó la misma configuración
- 1695 del experimento **MASS-1** excepto por el sistema de seguimiento.
- 1696 • **Página del proyecto :** <https://stratocat.com.ar/fichas-e/1991/FSU-19910923.htm>
- 1697

1698 - **CAPRICE** (Cosmic AntiParticle Ring Imaging Cherenkov Experiment)

- 1699 • **Nombre:** Experimento Cómico de Imágenes de Anillo de Antipartículas de
- 1700 Cherenkov.
- 1701 • **Resumen:** Busca estudiar el flujo de rayos cósmicos sin demasiado fondo
- 1702 de partículas producidas atmosféricamente, esto es posible por el uso de un
- 1703 espectrómetro capaz de discriminar entre diferentes partículas. El proyecto
- 1704 se enfoca en estudiar los núcleos de antimateria, luz en los rayos cósmicos
- 1705 así como los muones en la atmósfera, específicamente mide el flujo de las
- 1706 antipartículas (antiprotones y positrones) por encima de aproximadamente
- 1707  $5 \text{ GeV}$  y relaciona los flujos con modelos que incluyen la producción exótica
- 1708 de antipartículas como partículas supersimétricas de materia oscura.
- 1709 • **Página del proyecto :** <https://cds.cern.ch/record/5608>

1710 - **HEAT** (High-Energy Antimatter Telescope)

- 1711 • **Nombre:** Telescopio de Antimateria de Altas Energías
- 1712 • **Resumen:** Busca optimizar la detección e identificación de electrones de
- 1713 rayos cósmicos y positrones a energías de aproximadamente  $1 \text{ GeV}$  hasta
- 1714  $50 \text{ GeV}$ , mediante la implementación de un imán superconductor de dos
- 1715 bobinas y un hodoscopio de seguimiento de precisión, complementado con un
- 1716 sistema de tiempo de vuelo, un detector de radiación de transición y un conta-
- 1717 dor de ducha electromagnético, de esta forma medir la diferencia en el tiempo
- 1718 entre la detección de una partícula ionizante en un tubo de deriva y un im-
- 1719 pulso generado por el disparador del experimento. Algunos de sus resultados
- 1720 se muestran en la referencia Hooper y Kribs [2004].
- 1721 • **Página del proyecto :** <http://stratocat.com.ar/fichas-e/1994/FSU-19940503.htm>
- 1722

1723 - **LHC** (Large Hadron Collider)

- 1724 • **Nombre:** Gran Colisionador de Hadrones
- 1725 • **Resumen:** Ya que debido a que una partícula de materia oscura debería te-
- 1726 ner interacciones insignificantes con la materia visible normal, entonces estás

1727 interacciones pueden detectarse indirectamente como energía y momento fal-  
1728 tantes que escapan de los detectores como resultado de las colisiones de haces  
1729 de protones. Cualquier descubrimiento en las búsquedas de los colisionadores  
1730 debe ser corroborado por resultados en los sectores de detección indirecta o  
1731 directa en otros experimentos.

- 1732 • **Página del proyecto** : [https://home.cern/science/accelerators/  
1733 large-hadron-collider](https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider).

1734 - Otros experimentos :

- 1735 - **MOA** (Microlensing Observations in Astrophysics)  
1736 **Página del proyecto** : [http://www.tekapotourism.co.nz/info/mt\\_john.  
1737 html](http://www.tekapotourism.co.nz/info/mt_john.html)
- 1738 - **VERITAS** (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)  
1739 **Página del proyecto** : <https://veritas.sao.arizona.edu/>

1740

# Bibliografía

- 1741 1742 1743 1744 1745 ALWALL, J., FREDERIX, R., FRIXIONE, S., HIRSCHI, V., MALTONI, F., MATTELAER,  
O., SHAO, H.S., STELZER, T., TORRIELLI, P., Y ZARO, M. The automated computa-  
tion of tree-level and next-to-leading order differential cross sections, and their mat-  
ching to parton shower simulations. *J. High Energ. Phys.* **2014**(7):79 (2014). ArXiv:  
1405.0301
- 1746 1747 BATTISTON, R. The anti matter spectrometer (AMS-02): a particle physics detector in  
space. *J. Phys.: Conf. Ser.* **116**:012001 (2008)
- 1748 1749 BERGH, S.V.D. The Early History of Dark Matter. *PUBL ASTRON SOC PAC*  
**111**(760):657–660 (1999). ArXiv: astro-ph/9904251
- 1750 1751 1752 1753 BINOTH, T., GUFFANTI, A., GUILLET, J.P., HEINRICH, G., KARG, S., KAUER, N.,  
MERTSCH, P., REITER, T., REUTER, J., Y SANGUINETTI, G. Precise predictions  
for LHC using a GOLEM. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **183**:91–96  
(2008). ArXiv: 0807.0605
- 1754 1755 1756 BUCKLEY, A., FERRANDO, J., LLOYD, S., NORDSTROM, K., PAGE, B., RUEFE-  
NACHT, M., SCHOENHERR, M., Y WATT, G. LHAPDF6: parton density access in  
the LHC precision era. *Eur. Phys. J. C* **75**(3):132 (2015). ArXiv: 1412.7420
- 1757 1758 1759 BUONOCORE, L., FRUGUELE, C., MALTONI, F., MATTELAER, O., Y TRAMONTANO,  
F. Event generation for beam dump experiments. *J. High Energ. Phys.* **2019**(5):28  
(2019). ArXiv: 1812.06771
- 1760 1761 BÍLEK, M., THIES, I., KROUPA, P., Y FAMAEDY, B. MOND simulation suggests the ori-  
gin of some peculiarities in the Local Group. *A&A* **614**:A59 (2018). ArXiv: 1712.04938
- 1762 1763 COLLABORATION, P. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *ar-  
Xiv:1807.06209 [astro-ph]* (2019). ArXiv: 1807.06209
- 1764 1765 COLLESS, M. Y DUNN, A.M. Structure and Dynamics of the Coma Cluster. *ApJ*  
**458**:435 (1996). ArXiv: astro-ph/9508070
- 1766 1767 1768 CONTE, E., FUKS, B., Y SERRET, G. MadAnalysis 5, a user-friendly framework for  
collider phenomenology. *Computer Physics Communications* **184**(1):222–256 (2013).  
ArXiv: 1206.1599

- 1769 DE FAVEREAU, J., DELAERE, C., DEMIN, P., GIAMMANCO, A., LEMAÎTRE, V., MER-  
 1770 TENS, A., Y SELVAGGI, M. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation  
 1771 of a generic collider experiment. *J. High Energ. Phys.* **2014**(2):57 (2014a). ArXiv:  
 1772 1307.6346
- 1773 DE FAVEREAU, J., DELAERE, C., DEMIN, P., GIAMMANCO, A., LEMAÎTRE, V., MER-  
 1774 TENS, A., Y SELVAGGI, M. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation  
 1775 of a generic collider experiment. *J. High Energ. Phys.* **2014**(2):57 (2014b). ArXiv:  
 1776 1307.6346
- 1777 DENNER, A., DITTMAIER, S., Y HOFER, L. Collier: a fortran-based Complex One-Loop  
 1778 Library in Extended Regularizations. *Computer Physics Communications* **212**:220–  
 1779 238 (2017). ArXiv: 1604.06792
- 1780 DEUR, A. Relativistic corrections to the rotation curves of disk galaxies. *ar-  
 1781 Xiv:2004.05905 [astro-ph, physics:gr-qc]* (2020). ArXiv: 2004.05905
- 1782 ELLIS, R.K. Y ZANDERIGHI, G. Scalar one-loop integrals for QCD. *J. High Energy  
 1783 Phys.* **2008**(02):002–002 (2008). ArXiv: 0712.1851
- 1784 FOSALBA, P., CROCCE, M., GAZTANAGA, E., Y CASTANDER, F.J. The MICE Grand  
 1785 Challenge Lightcone Simulation I: Dark matter clustering. *arXiv:1312.1707 [astro-ph]*  
 1786 (2015). ArXiv: 1312.1707
- 1787 HIRSCHI, V. Y PERARO, T. Tensor integrand reduction via Laurent expansion. *J. High  
 1788 Energ. Phys.* **2016**(6):60 (2016). ArXiv: 1604.01363
- 1789 HOOPER, D. Y KRIBS, G.D. Kaluza-Klein Dark Matter and the Positron Excess. *Phys.  
 1790 Rev. D* **70**(11):115004 (2004). ArXiv: hep-ph/0406026
- 1791 LI, Z.Y., MENDEZ, C.J.D., GIOVACCHINI, F., HAINO, S., Y HOFFMAN, J. Antiproton  
 1792 identification below threshold with the AMS-02 RICH detector. *Chinese Phys. C*  
 1793 **41**(5):056001 (2017). Publisher: IOP Publishing
- 1794 MARSH, G.E. Strings, Topological Change and Dark Matter. *arXiv:1909.01077 [gr-qc,  
 1795 physics:hep-th, physics:physics]* (2019). ArXiv: 1909.01077
- 1796 MASTROLIA, P., MIRABELLA, E., Y PERARO, T. Integrand reduction of one-loop scat-  
 1797 tering amplitudes through Laurent series expansion. *J. High Energ. Phys.* **2012**(6):95  
 1798 (2012). ArXiv: 1203.0291
- 1799 MIELKE, E.W., FUCHS, B., Y SCHUNCK, F.E. Dark Matter Halos as Bose-Einstein  
 1800 Condensates. *The Tenth Marcel Grossmann Meeting* págs. 39–58 (2006). ArXiv: astro-  
 1801 ph/0608526

- 1802 MUNSHI, D. Y JAIN, B. Statistics of Weak Lensing at Small Angular Scales: Analytical  
 1803 Predictions for Lower Order Moments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical*  
 1804 *Society* **322**(1):107–120 (2001). ArXiv: astro-ph/9912330
- 1805 NAGY, Z. Y SOPER, D.E. What is a parton shower? *Phys. Rev. D* **98**(1):014034 (2018).  
 1806 ArXiv: 1705.08093
- 1807 PERARO, T. Ninja: Automated Integrand Reduction via Laurent Expansion for One-  
 1808 Loop Amplitudes. *Computer Physics Communications* **185**(10):2771–2797 (2014). Ar-  
 1809 Xiv: 1403.1229
- 1810 ROJAS, G. Teoría de gravitación no simétrica. *Integración: Temas de matemáticas*  
 1811 **26**(2):77–88 (2008). Publisher: Universidad Industrial de Santander Section: Integra-  
 1812 ción: Temas de matemáticas
- 1813 ROMAO, J.C. Y SILVA, J.P. A resource for signs and Feynman diagrams of the Standard  
 1814 Model. *Int. J. Mod. Phys. A* **27**(26):1230025 (2012). ArXiv: 1209.6213
- 1815 RUBAKOV, V.A. Harrison–Zeldovich spectrum from conformal invariance. *J. Cosmol.*  
 1816 *Astropart. Phys.* **2009**(09):030–030 (2009). ArXiv: 0906.3693
- 1817 SANTAMARIA, A. Masses, Mixings, Yukawa Couplings and their Symmetries. *Physics*  
 1818 *Letters B* **305**(1-2):90–97 (1993). ArXiv: hep-ph/9302301
- 1819 SCHÄFER, C., FOURESTEY, G., Y KNEIB, J.P. Lenstool-HPC: A High Performan-  
 1820 ce Computing based mass modelling tool for cluster-scale gravitational lenses. *ar-  
 1821 Xiv:2004.06352 [astro-ph]* (2020). ArXiv: 2004.06352
- 1822 SERVANT, G. Y TAIT, T.M.P. Is the Lightest Kaluza-Klein Particle a Viable Dark Mat-  
 1823 ter Candidate? *Nuclear Physics B* **650**(1-2):391–419 (2003). ArXiv: hep-ph/0206071
- 1824 SJÖSTRAND, T., ASK, S., CHRISTIANSEN, J.R., CORKE, R., DESAI, N., ILTEN, P.,  
 1825 MRENNA, S., PRESTEL, S., RASMUSSEN, C.O., Y SKANDS, P.Z. An Introduction  
 1826 to PYTHIA 8.2. *Computer Physics Communications* **191**:159–177 (2015a). ArXiv:  
 1827 1410.3012
- 1828 SJÖSTRAND, T., ASK, S., CHRISTIANSEN, J.R., CORKE, R., DESAI, N., ILTEN, P.,  
 1829 MRENNA, S., PRESTEL, S., RASMUSSEN, C.O., Y SKANDS, P.Z. An Introduction  
 1830 to PYTHIA 8.2. *Computer Physics Communications* **191**:159–177 (2015b). ArXiv:  
 1831 1410.3012
- 1832 VAN DER MAREL, R.P., BESLA, G., COX, T.J., SOHN, S.T., Y ANDERSON, J. The  
 1833 M31 Velocity Vector. III. Future Milky Way-M31-M33 Orbital Evolution, Merging,  
 1834 and Fate of the Sun. *ApJ* **753**(1):9 (2012). ArXiv: 1205.6865
- 1835 VAN HAMEREN, A. OneLoop: for the evaluation of one-loop scalar functions. *Computer*  
 1836 *Physics Communications* **182**(11):2427–2438 (2011). ArXiv: 1007.4716

- <sup>1837</sup> WANG, F. A novel pulsed fiber laser: Further study on the bias-pumped gain-switched  
<sup>1838</sup> fiber laser. *Laser Phys. Lett.* **15**(8):085105 (2018). ArXiv: 1804.00444
- <sup>1839</sup> WELLS, P.S. The upgraded ATLAS and CMS detectors and their physics capabili-  
<sup>1840</sup> ties. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and*  
<sup>1841</sup> *Engineering Sciences* **373**(2032):20140046 (2015). Publisher: Royal Society
- <sup>1842</sup> WU, X. Y KROUPA, P. Galactic rotation curves, the baryon-to-dark-halo-mass relation  
<sup>1843</sup> and space-time scale invariance. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*  
<sup>1844</sup> **446**(1):330–344 (2015). ArXiv: 1410.2256