

Desarrollo de una red neuronal para rechazar eventos de fondo en el detector de materia oscura DEAP-3600

Defensa del Trabajo Fin de Máster

Iñaki Rodríguez García

Máster en Física Teórica

Universidad Complutense de Madrid

Directores: Miguel Cárdenas-Montes y Roberto Santorelli

CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas)

19 de septiembre de 2019



- 1 Introducción a la materia oscura.
- 2 Búsqueda directa de materia oscura.
- 3 Experimento DEAP-3600.
- 4 Redes neuronales.
- 5 Resultados.
- 6 Conclusiones y trabajo futuro.

Introducción a la materia oscura

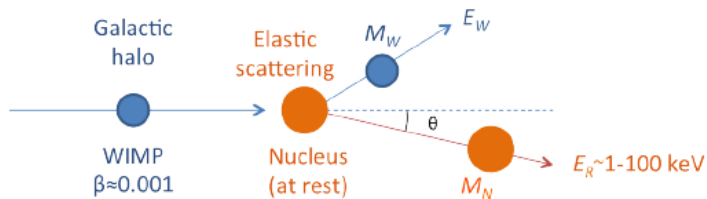
Parte fundamental del Modelo Cosmológico Estándar (ΔCDM)

Es el 26.1 % de la energía del Universo y el 83.7 % de la materia.

Candidatos:

- Agujeros negros primordiales.
- Objetos Astronómicos de Halo Compacto.
- Gravedad modificada.
- Partículas exóticas:
 - ▶ Neutrinos estériles.
 - ▶ Axiones.
 - ▶ *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMP).

Búsqueda directa de materia oscura



Choque elástico WIMP-núcleo \rightarrow retroceso nuclear.

Diversas tecnologías, destacan gases nobles:

- Excelente centellador.
- Bajo coste.
- Recolección de señales de luz y carga eléctrica.

Figura obtenida de B. Montes Núñez. PhD Thesis, UCM, (2016).

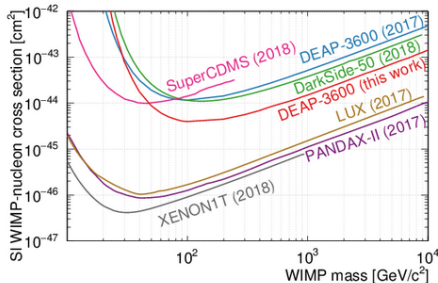
Uso de detectores de Argón

- Números atómico y másico pares ($A=18$, $Z=40$), luego spin nulo. Solo observable la sección eficaz independiente de spin:

$$\sigma_0^{SI} = \frac{4\mu^2}{\pi} \{Zf_p + (A - Z)f_n\}$$

- Excelente centellador:
Energía de centelleo (9.8 eV) menor a la energía de ionización (15.76 eV).
- Contaminación ambiental de Argón-39, emisor β con 1 Bq de actividad.
- Discriminación por forma de pulso (PSD):
Permite distinguir retrocesos nucleares y electrónicos.

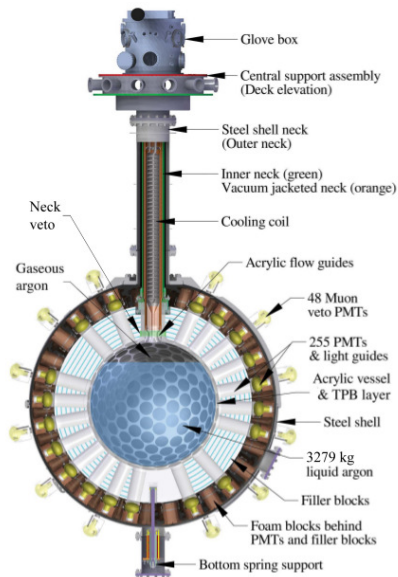
Figura de: R. Ajaj et al.(DEAP Col.) Phys. Rev. D **100**, 022004 (2019)



El experimento DEAP-3600

- Situado en SNOLAB a 2 km bajo tierra (6000 m.w.e. de protección).
- Esfera de 85 cm de radio rellena con 3279 kg de Argón líquido.
- Interfase líquido-gas a 55 cm sobre el ecuador.
- 255 fotomultiplicadores (PMTs) cubriendo el 71 % de la esfera.
- Interior del acrílico recubierto de TPB: 128 nm \rightarrow 420 nm

Figura obtenida de R. Ajaj et al. (DEAP Collaboration) Phys. Rev. D **100**, 022004 (2019).



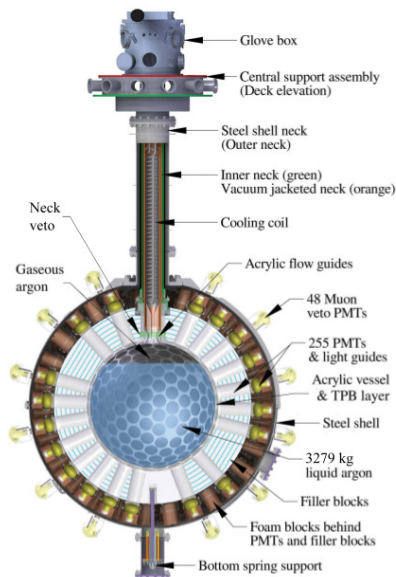
Zona fiducial y Región de Interés

- Altura por debajo de la interfase ($Z_{rec} < 55$ cm).
- Cota sobre el radio $R_{rec} < 63$ cm.
- Luz en los 10 PMTs superiores.
- Luz en los 15 PMTs inferiores.

Implica una masa fiducial de 825 kg.

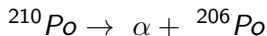
Región de interés:

$95 \text{ PE} < qPE < 200 \text{ PE}$.



Problema del cuello

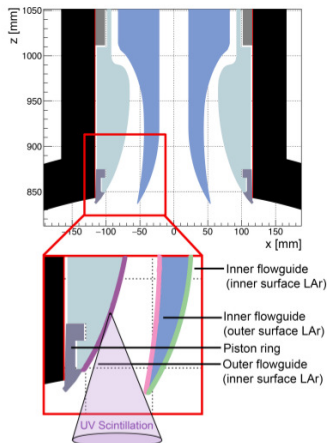
La mayor contribución en la Región de Interés de WIMPs proviene de los decaimientos α generados en la superficies del cuello.



Contribución de tres superficies

- Superficie Interna de la Guía Interna (IFG-IS)
- Superficie Externa de la Guía Interna (IFG-OS)
- Superficie Interna de la Guía Externa (OFG-IS)

Figura obtenida de R. Ajaj et al.
(DEAP Collaboration) Phys. Rev. D
100, 022004 (2019)



- 1 Recrear la selección actual de eventos para evaluar el rechazo y aceptancias actuales.
- 2 Integración en el equipo de análisis de fondo del experimento participando en un desafío de análisis multivariante (MVA).
- 3 Desarrollar una red neuronal que tenga la mejor aceptación para un rechazo del 99.9%.
- 4 La optimización de la red se realiza mediante una búsqueda codiciosa (*greedy search*).

Selección de eventos actual

Compuesta de 15 cortes en variables elaboradas, resaltan cinco diseños para el problema del cuello:

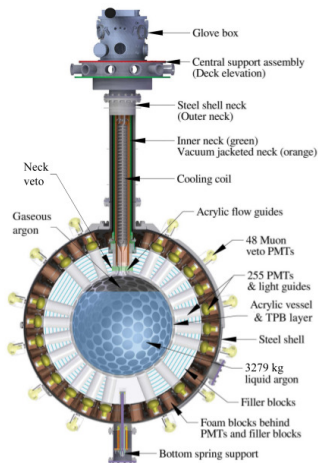
- Carga en los 10 PMTs superiores.

$$qPE_{10} < 0,04 qPE_{tot}$$

- Carga en los 15 PMTs inferiores.

$$qPE_{15} < 0,1 qPE_{tot}$$

- Tres primeros pulsos en gas.
- Coincidencia en los algoritmos de reconstrucción:
 - ▶ Coincidencia en Z_{rec} mayor del 90 %.
 - ▶ Coincidencia en R_{rec} mayor del 85 %.



Selección de eventos actual

$$\text{Poder de rechazo : } R_f = 1 - \frac{N_{bg;s}}{N_{bg}} \quad \text{Aceptancia : } A = \frac{N_{sg;s}}{N_{sg}}$$

$N_{sg/bg;s}$ eventos de señal/ fondo que pasan los cortes, $N_{sg/bg}$ total de eventos de señal/ fondo.

Corte	Poder de rechazo			Aceptancia
	IFG-IS	IFG-OS	OFG-IS	
10 PMTs superiores	0.534	0.532	0.467	0,722
15 PMTs inferiores	0.348	0.097	0.018	0.898
Pulsos tempranos en gas	0.822	0.821	0.810	0.466
Coincidencia en Z	0.732	0.736	0.642	0.810
Coincidencia en R	0,829	0.892	0.873	0.541
Acumulativo	0.974	0.976	0.975	0.185

$$R_f = 0,974 \quad A = 0,185$$

Fundamentos de redes neuronales

- Resolución de problemas de regresión numérica y clasificación.
- Constan de neuronas agrupadas en capas. Cada neurona representa un función multivariante $h(\vec{x}, \vec{\theta})$ y un vector de pesos ($\vec{\theta}$):

$$a_c^j = h(z) = h\left(\theta_c^0 + \sum_{i=1}^m \theta_c^i x_c^i\right)$$

- Agrupadas en capas. La salida de una capa es la entrada de la siguiente.

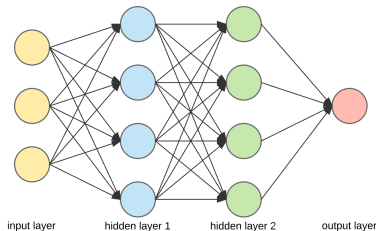


Figura obtenida de <https://towardsdatascience.com>

Métricas de calidad

- Necesario establecer un umbral u :

Si $y_{pred} \geq u \rightarrow$ Pos

Si $y_{pred} < u \rightarrow$ Neg

- Matriz de confusión:

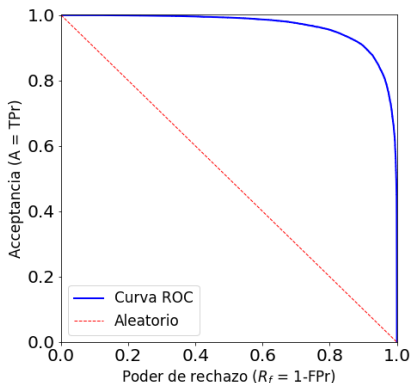
	Positivos predichos	Negativos predichos
Pos. reales	TP	FN
Neg. reales	FP	TN

- A partir de sus elementos:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \rightarrow A = TPR$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \rightarrow R_f = 1 - FPR$$

Elección de $u \rightarrow$ Curva ROC
(A vs R_f)



Área \rightarrow bondad del algoritmo:
 $\geq 0,95 \rightarrow$ Muy bueno.
 $> 0,97 \rightarrow$ Excelente.

- Clasificador binario alimentado solo por la luz del evento.
- **Input:** la carga en fotoelectrones recogida por los 255 PMTs normalizadas:

$$\overline{qPE}_i = \frac{qPE_i}{\sum_i qPE_i}$$

Se evita que aprenda sobre valores absolutos del evento, forzando a ver patrones de luz.

- **Salida:** una sola neurona con sigmoide como función de activación: Retrocesos nucleares \rightarrow 1; Cuello \rightarrow 0.
- **Optimización:** n^o de capas, neuronas/capa, *batch*, funciones, épocas.

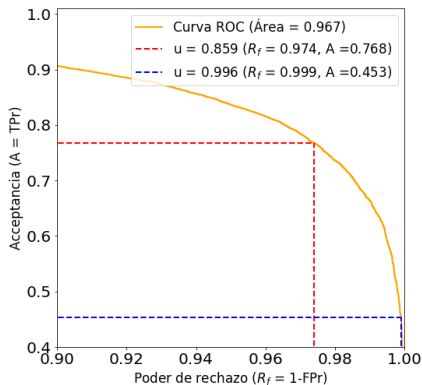
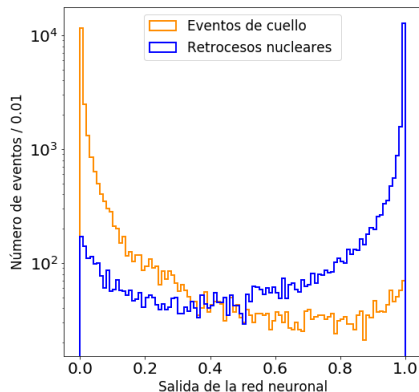
Optimización de la red

- **Optimización:** n° de capas, neuronas/capa, *batch*, funciones, épocas.
- Optimización mediante **búsqueda codiciosa** (*greedy search*).
- Buscando **maximizar** la aceptación para un rechazo del 99.9%.
- **Dataset:** 190020 datos Monte Carlo: (75 % entrenamiento, 25 % evaluación).

Origen	Entrenamiento	Evaluación
Superficie <i>IFG-IS</i>	23875	7795
Superficie <i>IFG-OS</i>	23745	7925
Superficie <i>OFG-IS</i>	23779	7891
Total cuello	71399	23611
Retrocesos nucleares	71116	23894

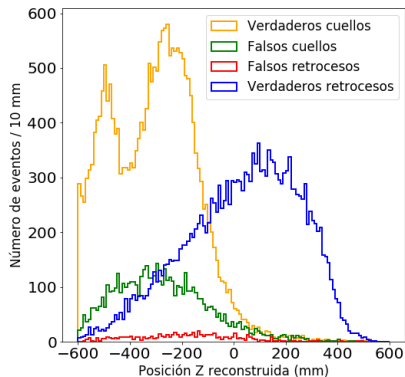
- **Resultado:**
 - ▶ Dos capas ocultas con 256 y 32 neuronas en la primera y segunda capa.
 - ▶ Función *relu* ($h(z) = \max(0, z)$) en ambas capas.
 - ▶ Tamaño del *batch* de 32 eventos por lote.
 - ▶ Entrenada 10 épocas.
 - ▶ Optimizador Adam con sus hiperparámetros predefinidos.

Resultados: elección del umbral

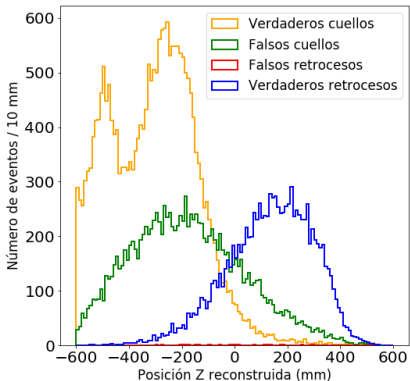


Umbral u	0.8586	0.9958	0.9998
Aceptancia (A)	0.7672	0.4531	0.1850
Rechazo (R_f)	0.9740	0.9990	0.9998

Resultados: dependencia con el eje Z



(c) $u = 0,8586$, $R_f = 0,9740$



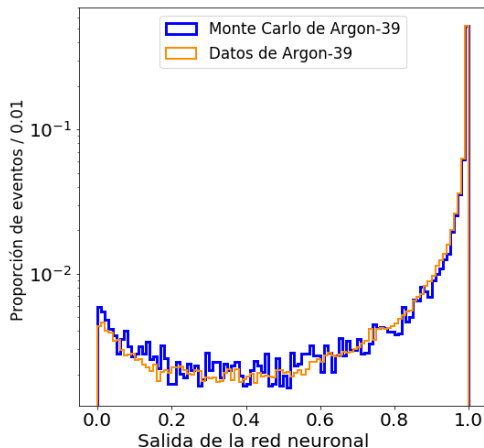
(d) $u = 0,9958$, $R_f = 0,9990$

- Cuanto mayor sea el umbral u más retrocesos nucleares se pierden en el hemisferio inferior del detector.

Resultados: validación con datos reales de Argón-39

Los retrocesos electrónicos de ^{39}Ar son usados para calibraciones.

- Se puede usar para una prueba realidad/simulación.
- **Objetivo:** mismo comportamiento.
- Prueba satisfactoria
- Además aceptancias similares:
 - ▶ Datos reales: 44,08 %
 - ▶ Simulados: 44,10 %



Conclusiones

- Ante el problema del fondo del cuello, se propone una nueva solución con redes neuronales.
- Antes se tenía un rechazo del 97.4 % y una aceptación del 18.5 %.
- **Con la red optimizada para un rechazo del 99.9 % se consigue una aceptación del 45.31 %.**
- La red ha pasado satisfactoriamente una prueba de validación con datos reales y simulados de Argón-39.0
- Implica que la red puede implementarse en la selección de eventos.

Conclusiones y trabajo futuro

- **Con la red optimizada para un rechazo del 99.9 % se consigue una aceptación del 45.31 %.**
- Trabajo futuro: re-análisis de los datos ya medidos y de los posteriores.
- Mejora de la sensibilidad en la curva de exclusión.

