

# **Machine Learning en el programa de Física Nuclear en GSI-FAIR**

XVIII Curso de Iniciación a la Investigación en Estructura de la Materia

*De las Partículas Elementales a los Sistemas de Alto Peso Molecular*

Christophe Rappold

# GSI-FAIR : El universo en el laboratorio



GSI : desde 1969 “Centro de Investigación de Iones Pesados”  
FAIR : desde 2006 ampliación del acelerador de GSI para 2025

# El centro actual de GSI y su acelerador

## Centro Alemán :

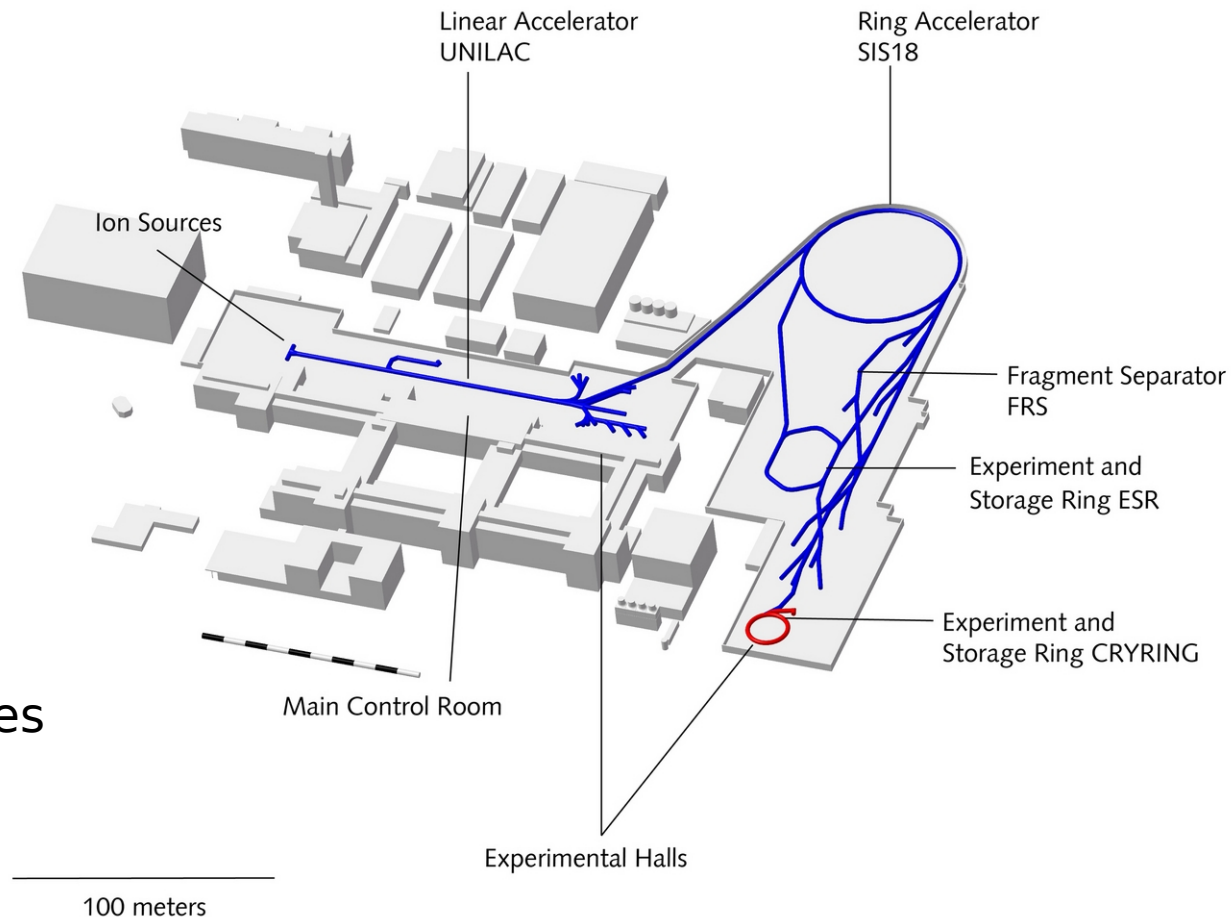
- 1.6k empleados
- 1k científicos visitantes

## Acelerador de iones pesados:

- p ... U
- Desde 14 MeV/u hasta 2 GeV/u

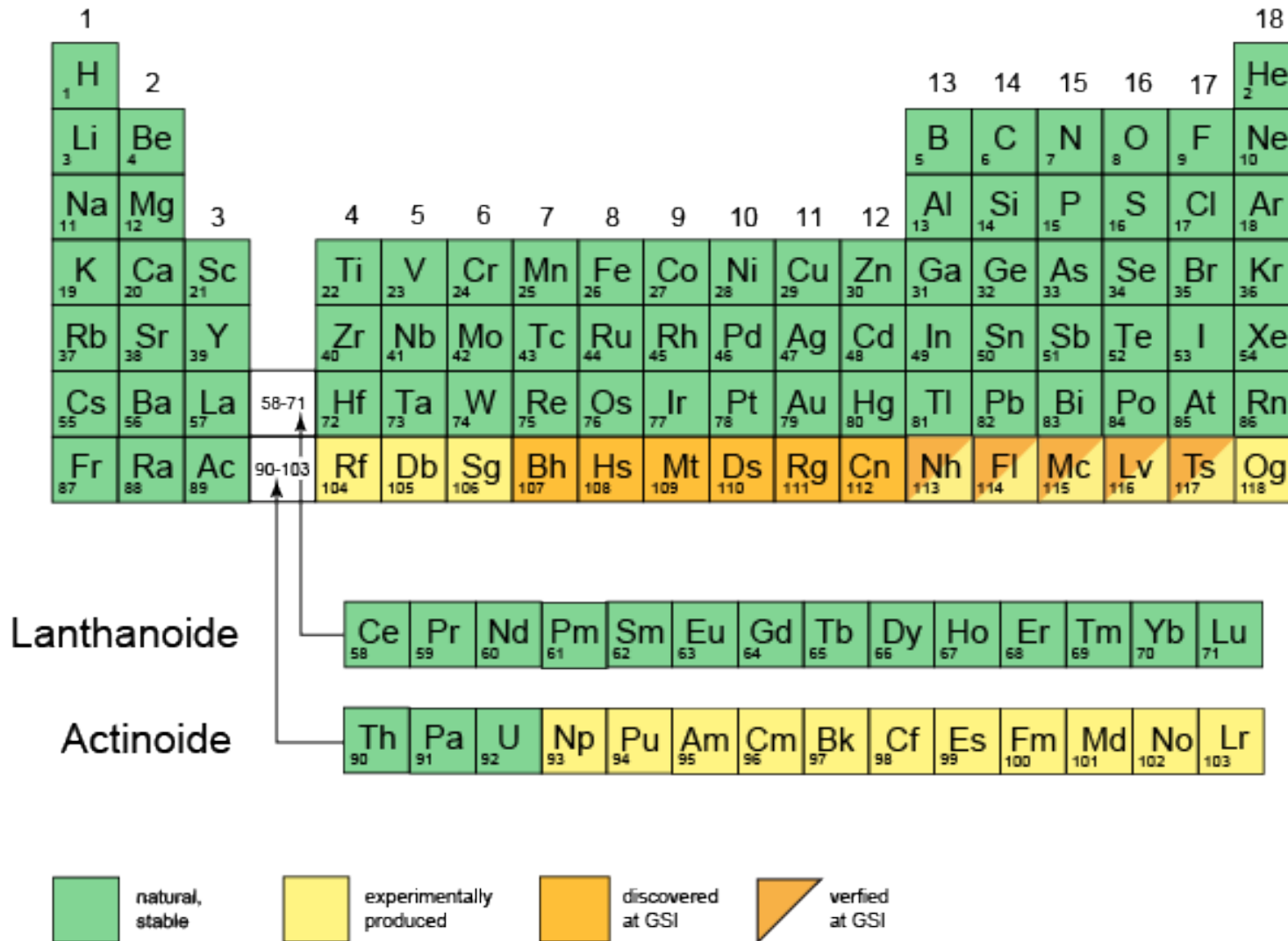
## Áreas de investigación:

- Física nuclear
- Física atómica
- Biofísica/Medicina
- Investigación de materiales
- Instrumentación y aplicaciones



# Principales descubrimientos de GSI

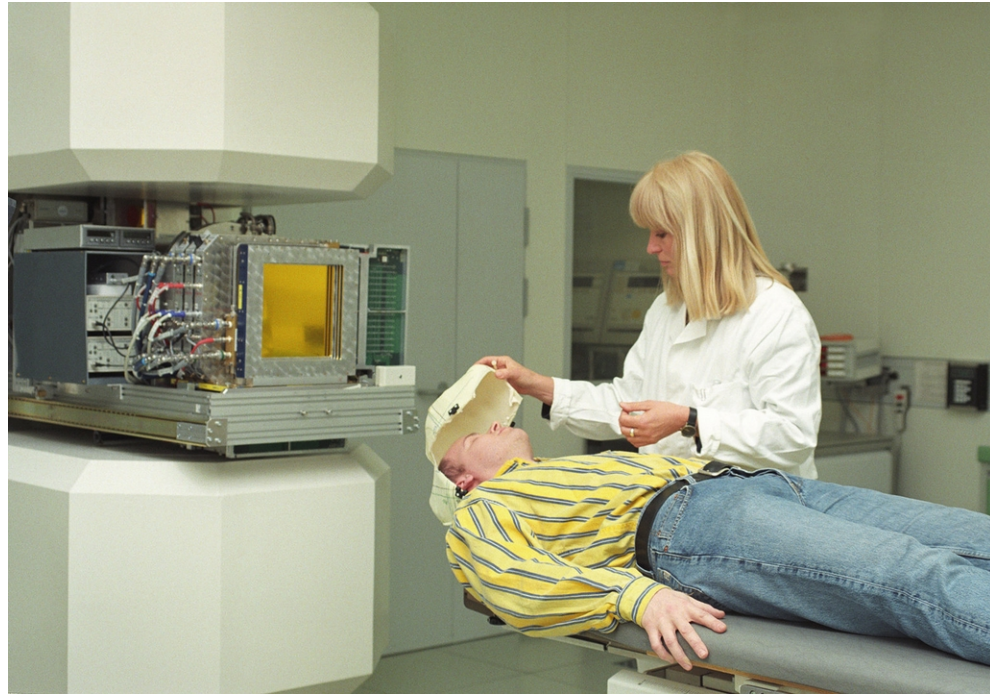
- Nuevos elementos:



Elementos 107 a 112 : primera vez en GSI / Elementos 113 a 117 : confirmado en GSI

# Principales descubrimientos de GSI

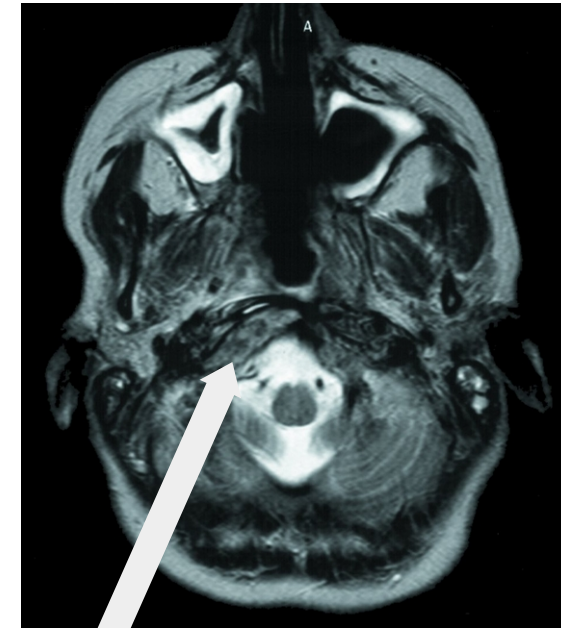
- Radioterapia con iones para cáncer en el cerebro



Después de investigaciones y experimentos piloto →  
Uso como tratamiento en hospital cubierto por los seguros médicos

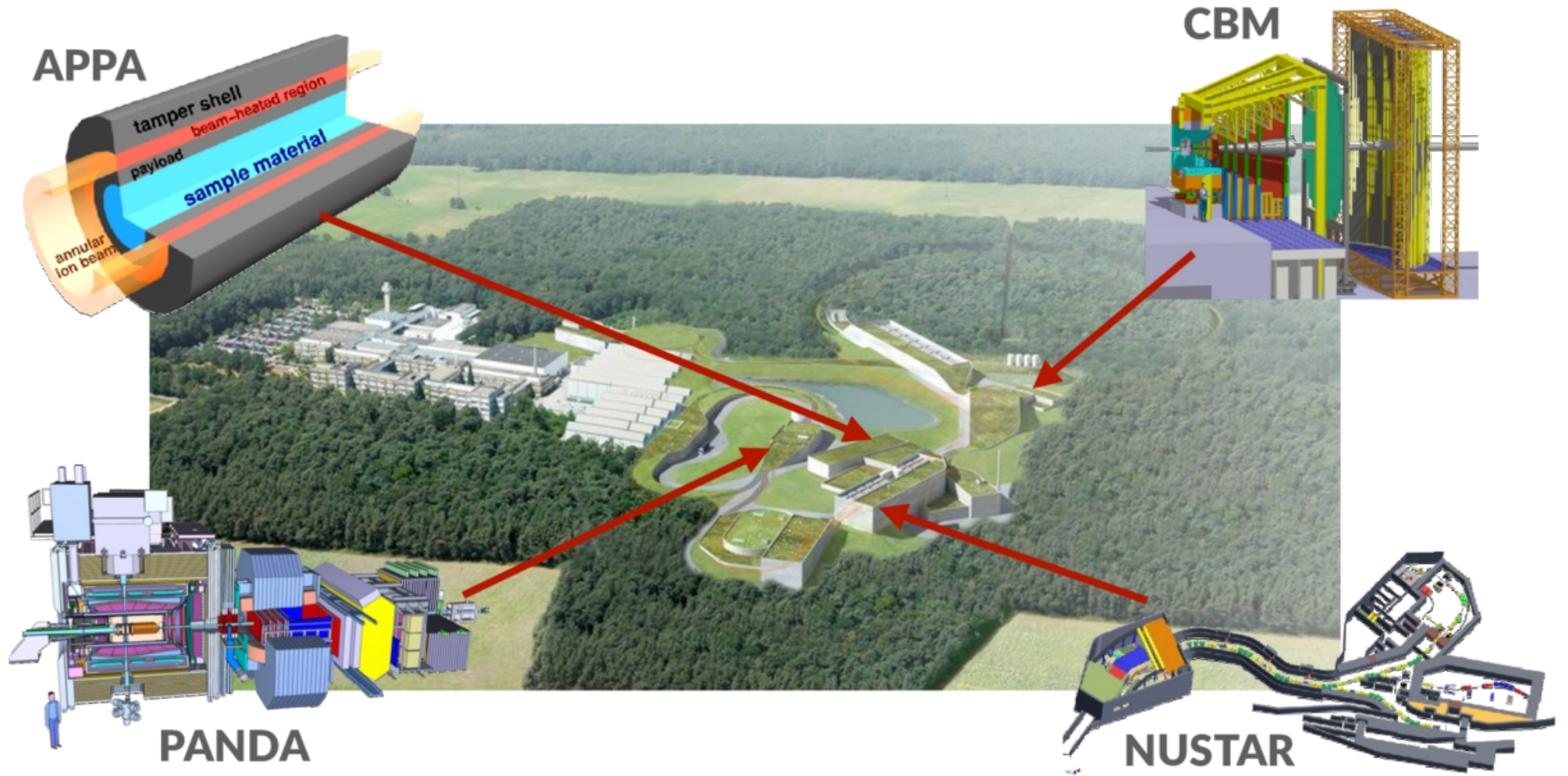


Antes el tratamiento con el haz de <sup>12</sup>C

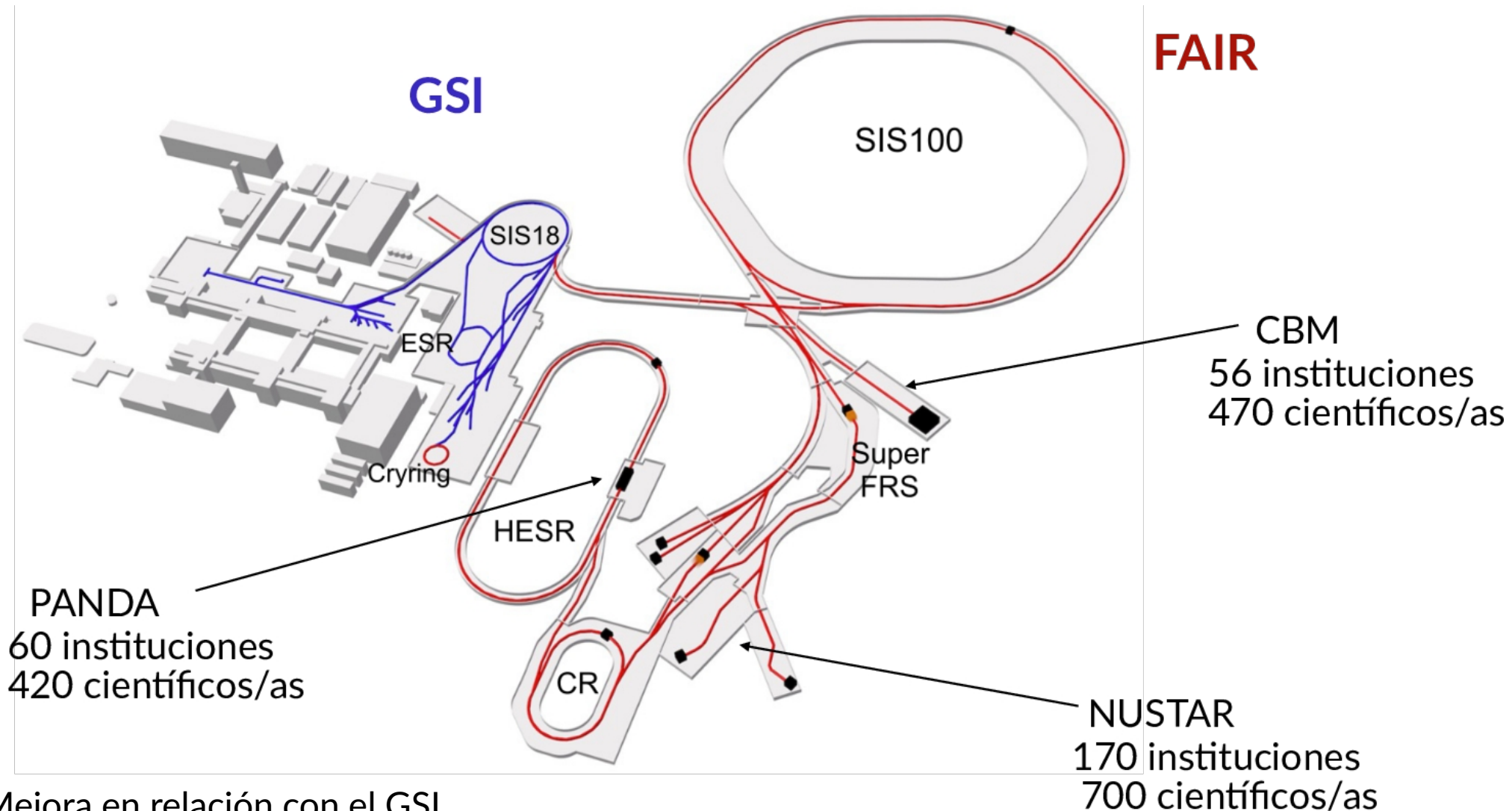


Después

# Que es el centro GSI-FAIR ?



# Los cuatro pilares científicos de FAIR



## Mejora en relación con el GSI

- 100 - 10.000 veces más intensidad
- 10 veces más energía de haz ( $100 \text{ Tm} \rightarrow 14 \text{ GeV/u } ^{12}\text{C}$ )
- haz de antiprotones
- conjunto de anillos de almacenamiento

# Los cuatro pilares científicos de FAIR

- **APPA :**
  - Física atómica y simetrías fundamentales,
  - Física del Plasma,
  - Investigación de Materiales,
  - Biología y radiación,
  - Terapia del Cáncer con Haces de Iones
- **CBM – HADES :**
  - Materia nuclear densa y caliente
- **NUSTAR :**
  - Estructura nuclear lejos de la estabilidad,
  - Física de la Nucleosíntesis Explosiva (r process)
- **PANDA:**
  - Estructura y dinámica de hadrones con haces de antiprotones



# Ejemplo: Síntesis de los elementos químicos

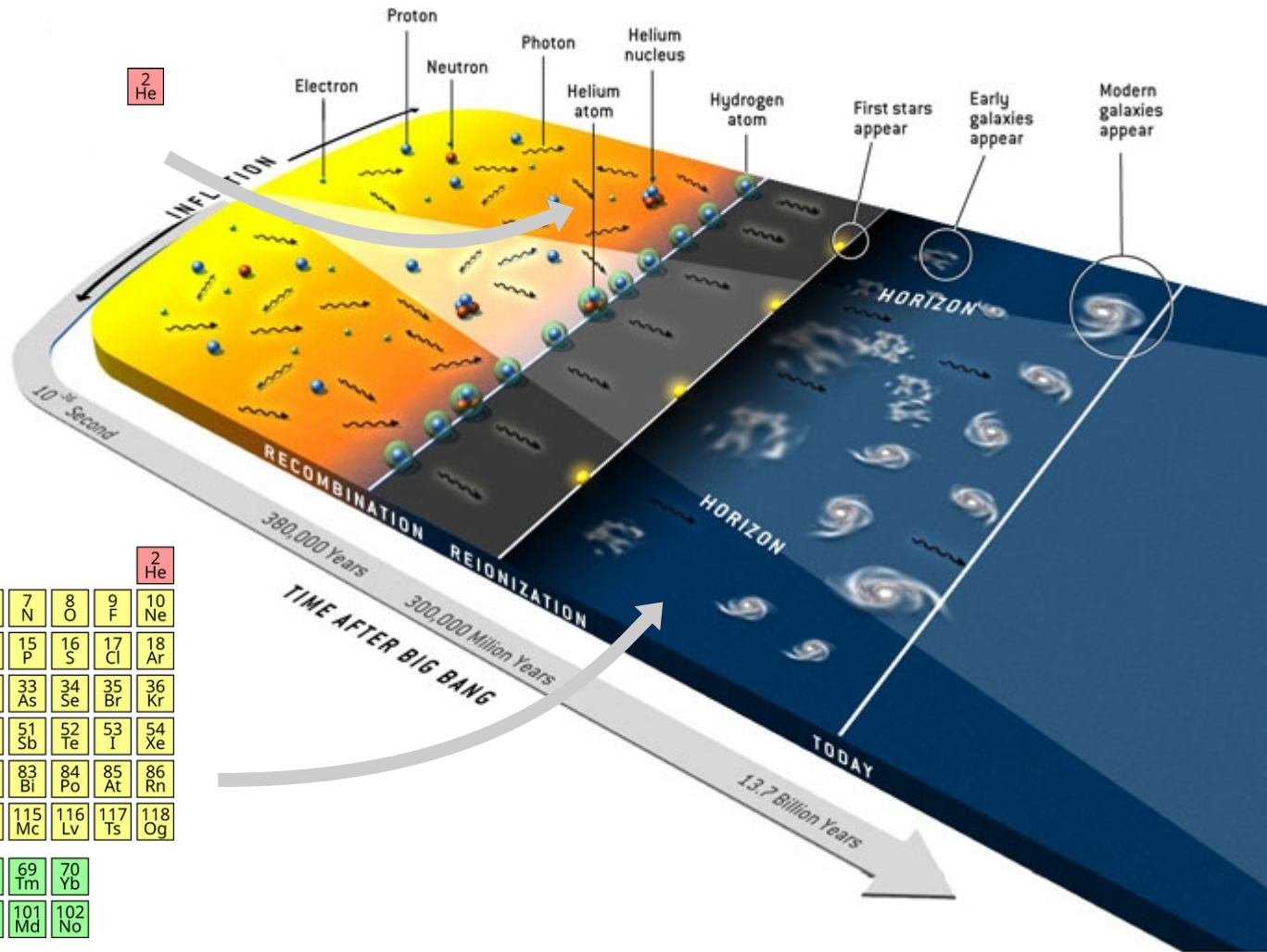
- ¿Dónde y cómo se formaron los elementos pesados en el universo?

Tabla de los elementos :

1	H
3	Li

2	He
---	----

1	H																	2	He																	
3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne					
11	Na	12	Mg																	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar					
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	
55	Cs	56	Ba	*	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	*	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Fl	115	Mc	116	Lv	117	Ts	118	Og
				*	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb				
				*	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No				



# Fusión de estrellas de neutrones y FAIR

## Fusión de estrellas de neutrones

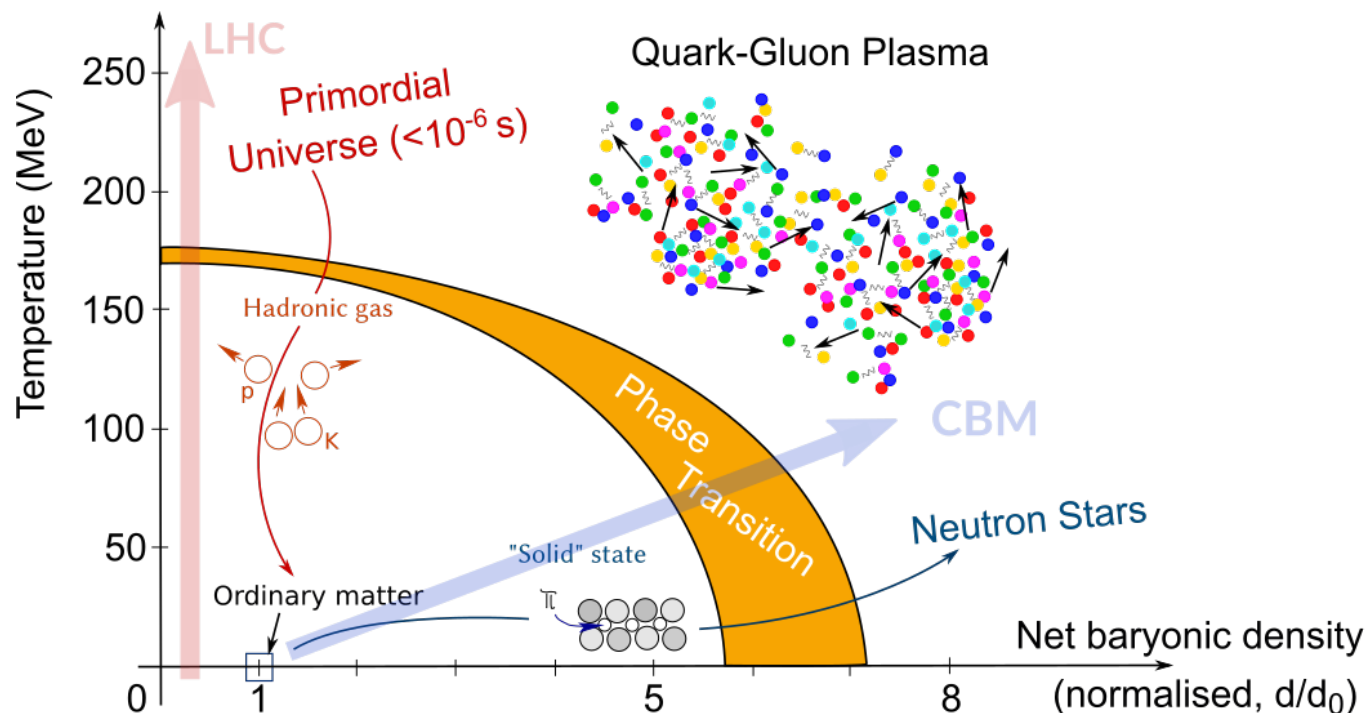


## Pilares de la investigación FAIR

- Ecuación de Estado (Hades, CBM)
    - Señal de ondas gravitacionales
  - Interacción barión-barión (PANDA)
  - Núcleos exóticos ricos en neutrones (NUSTAR)
    - nucleosíntesis del proceso r
    - abundancia de los elementos más pesados oro, platino, etc
- 
- FAIR ofrece oportunidades únicas para estudiar estas cuestiones fundamentales

# CBM - HADES

- Exploración del diagrama de fases de la materia nuclear



## A muy alta temperatura:

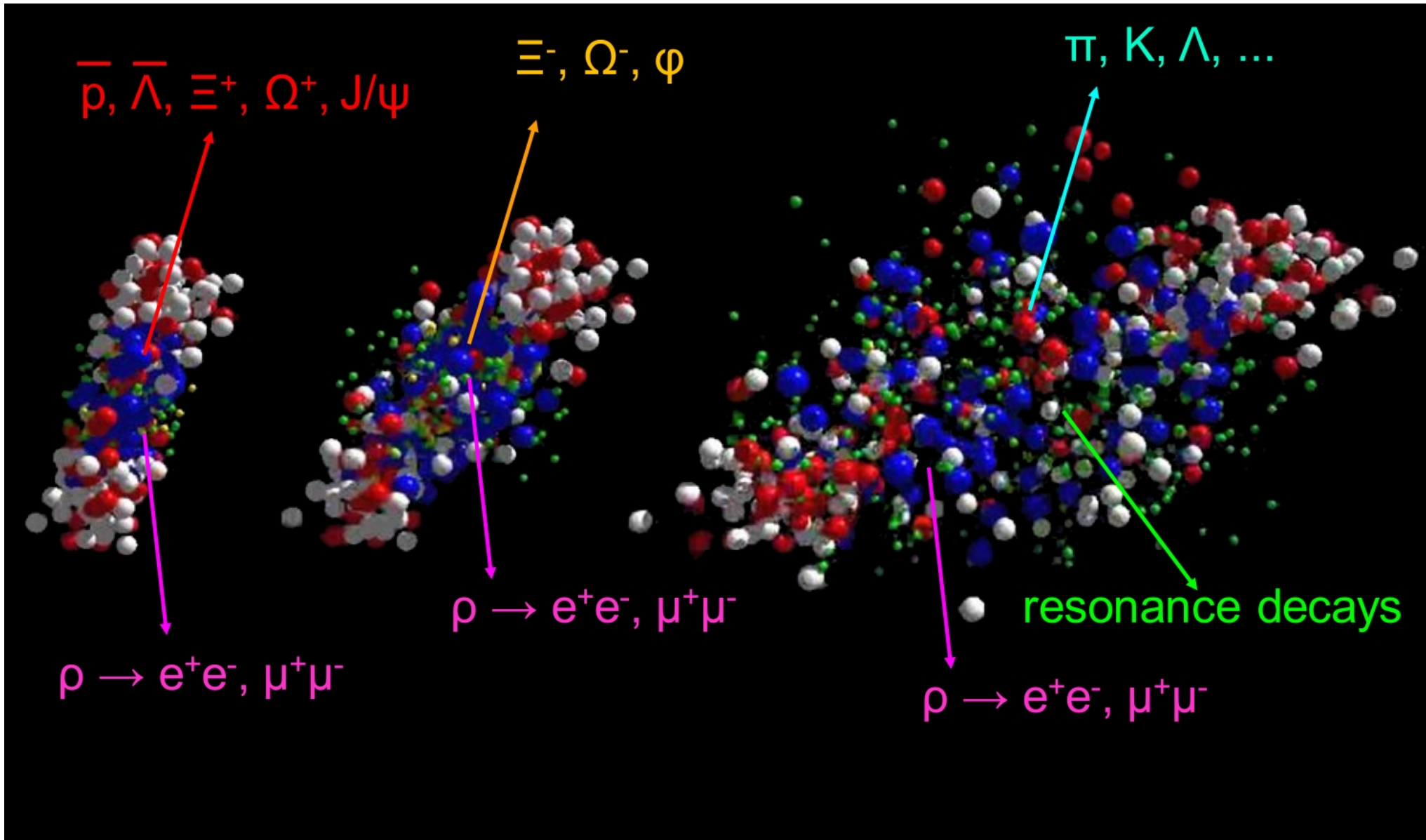
- N de bariones = N de antibariones
- Situación similar a la del universo primitivo
  - ALICE, ATLAS, CMS en el LHC
  - STAR, PHENIX en el RHIC

## A alta densidad de bariones

- N de bariones  $\gg$  N de antibariones
- Densidades como en los núcleos de las estrellas de neutrones
- Los modelos predicen una transición de fase de primer orden

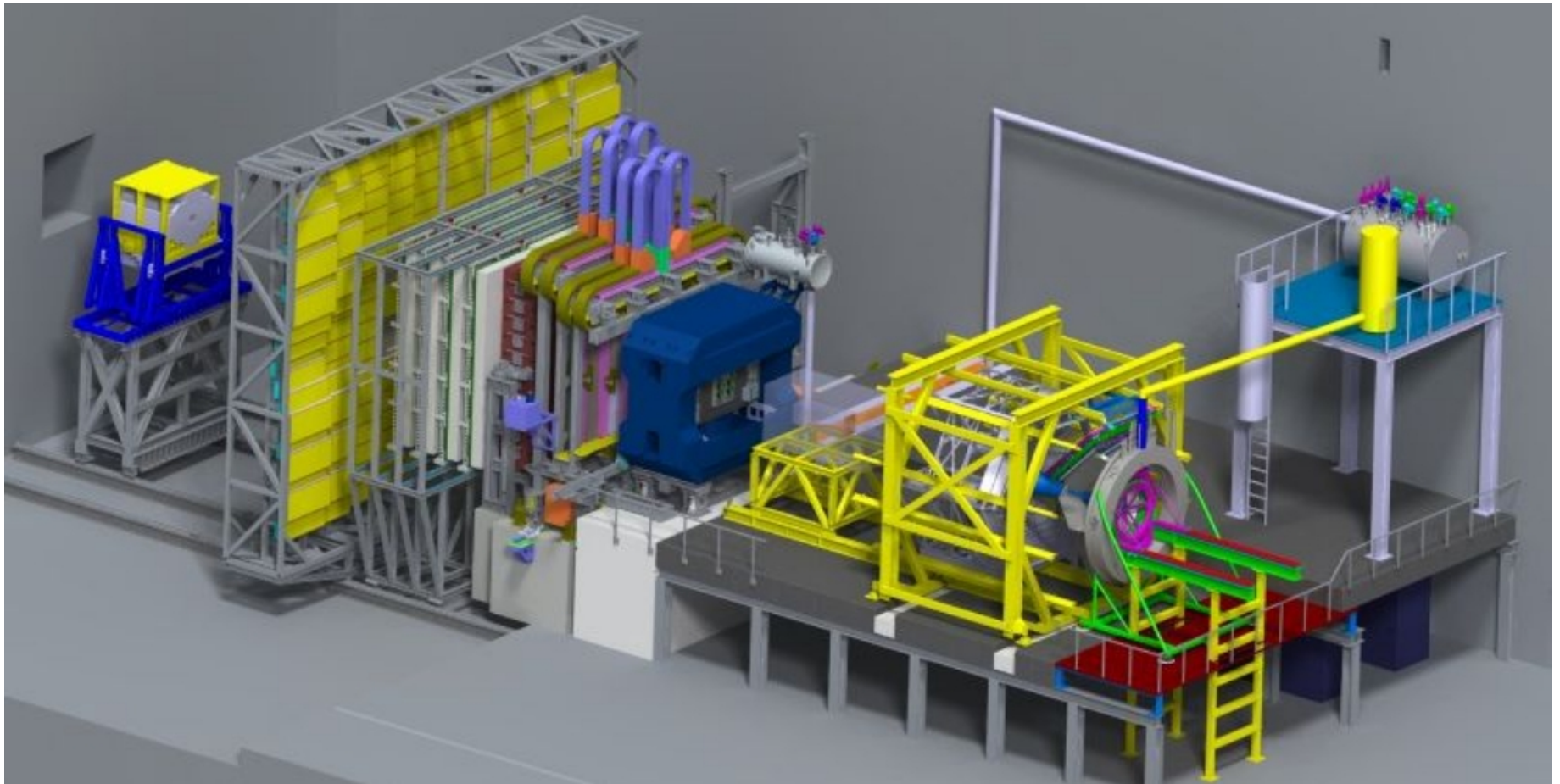
# Escasos mensajeros de la densa bola de fuego

- CBM en FAIR:



# CBM - HADES

- Compressed Baryonic Matter

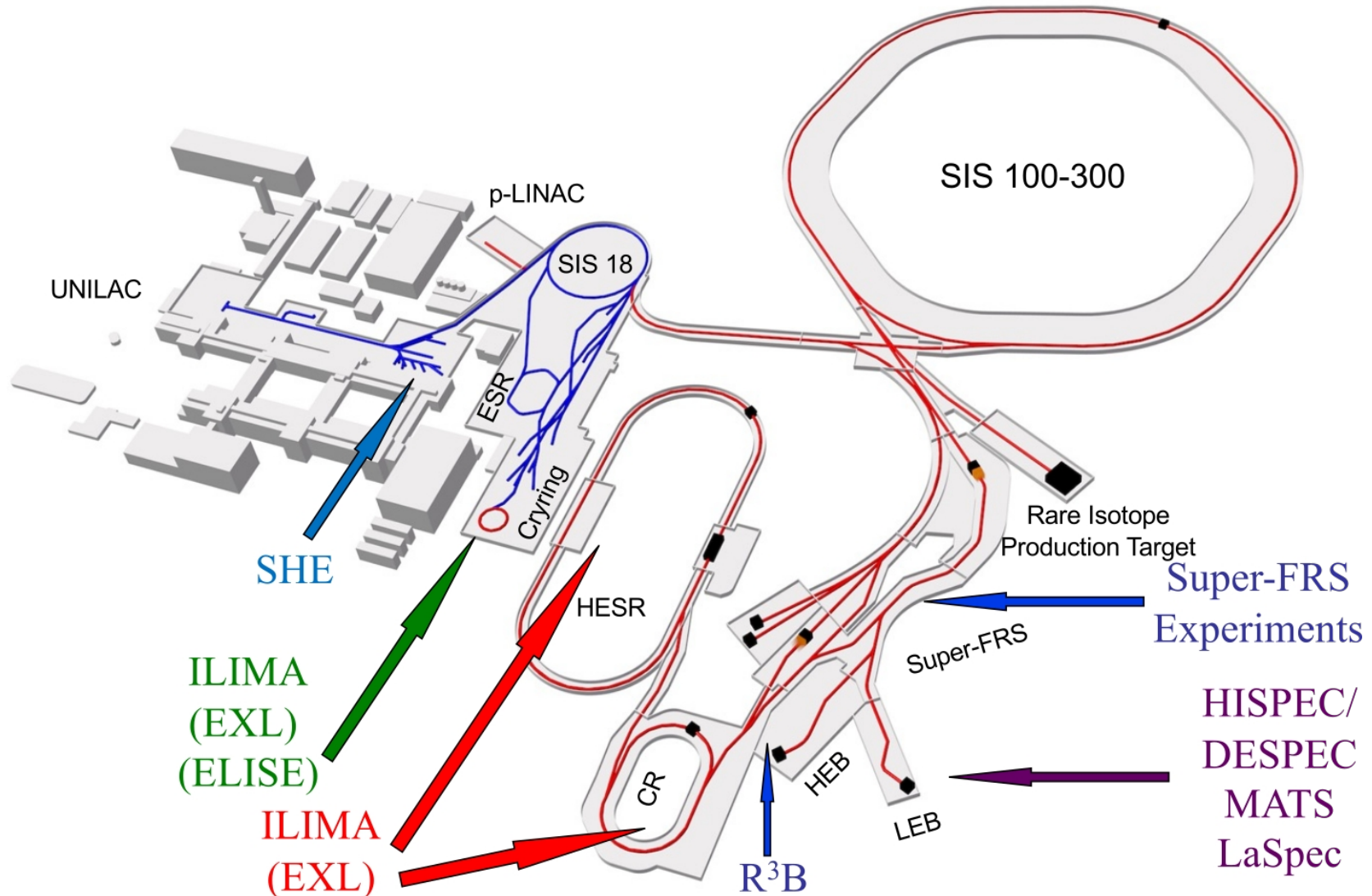


# NUSTAR :

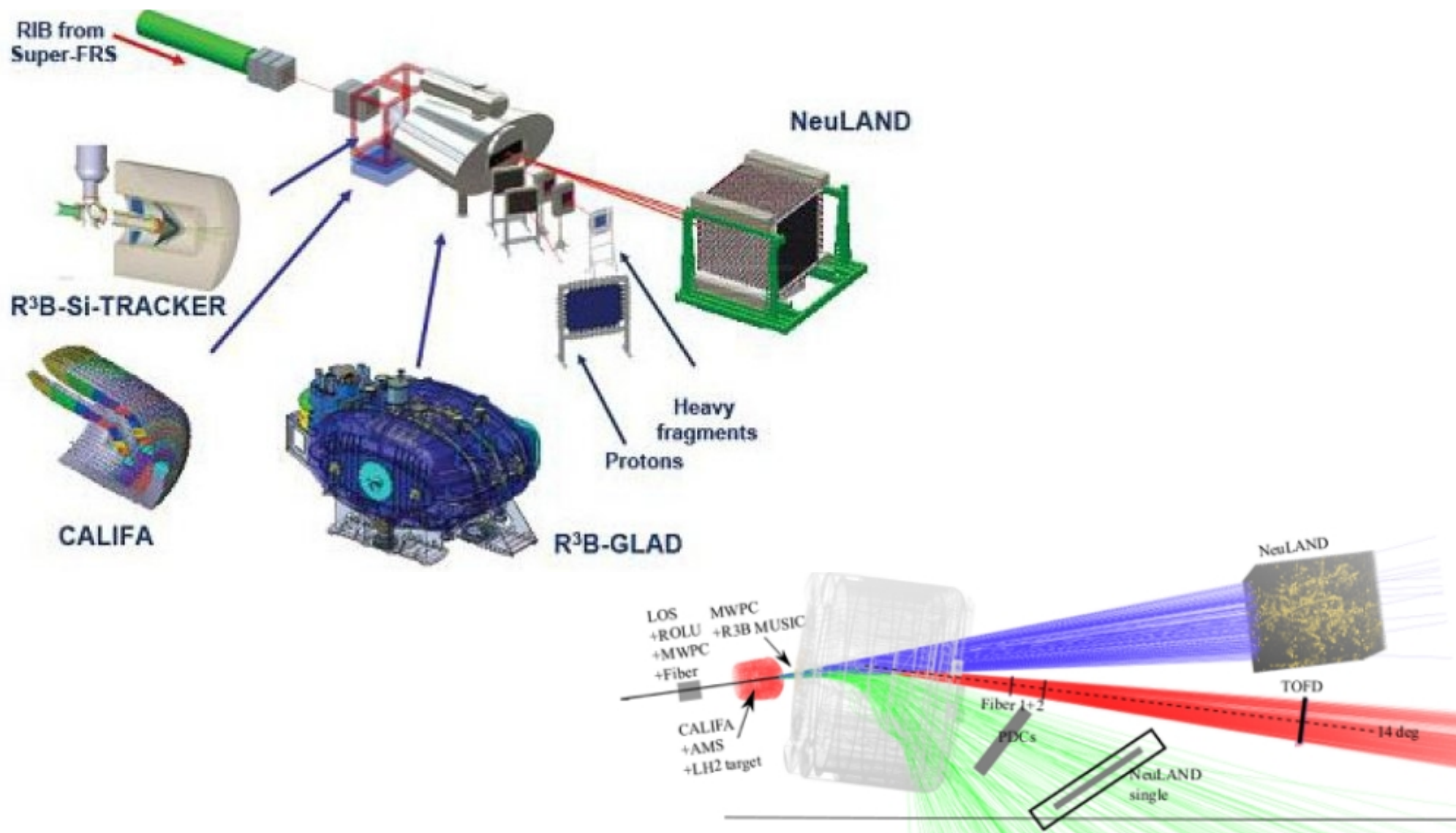
- **Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions**
  - DESPEC / HISPEC :
    - Espectroscopia de alta resolución en vuelo y espectroscopia de desintegración a baja e intermedia energía
  - R3B :
    - reacciones cinemáticamente completas a alta energía de haces radiactivos
  - Super FRS EC :
    - espectrómetro de alta resolución para nuevos isótopos, estudios de hipernúcleos, resonancias delta en el medio nuclear y espectroscopia de núcleos mesónicos

# NUSTAR :

- Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions



- Reacciones con haces radiactivos relativistas





# Uso de ML : identificación de partículas

- Reconstrucción del tiempo de vuelo:

- Datos experimentales:

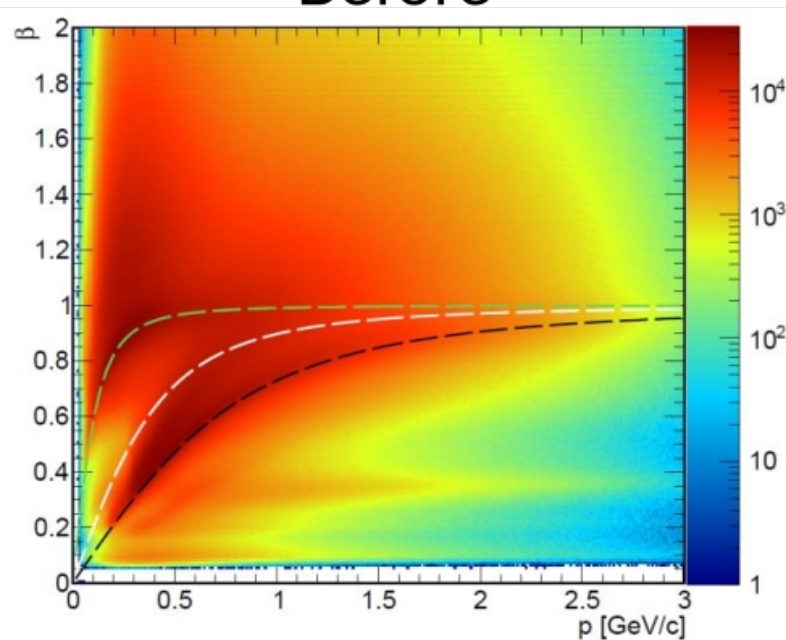
- Para identificar partículas : uso de correlación velocidad - momento

$$\beta = \frac{1}{c} \cdot \frac{L}{TOF}$$

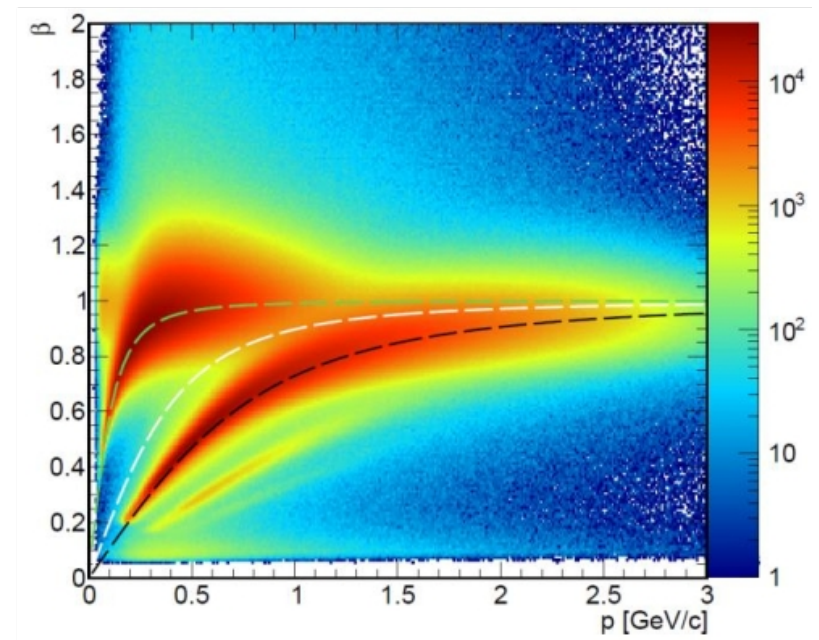
$$\beta = p / \sqrt{p^2 + m^2}$$

$$TOF = t_{stop} - t_{start}$$

Before



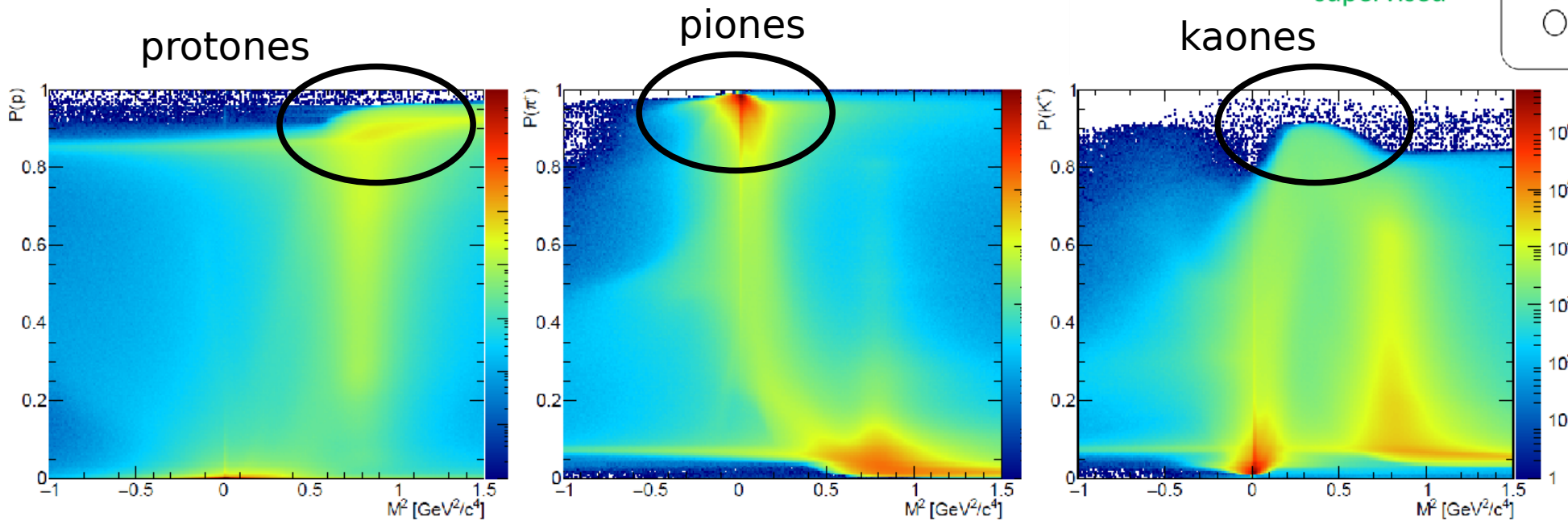
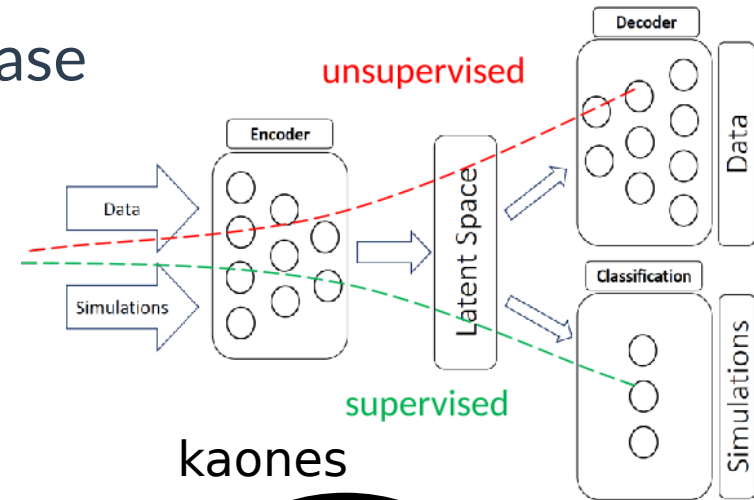
After



# Uso de ML : identificación de partículas

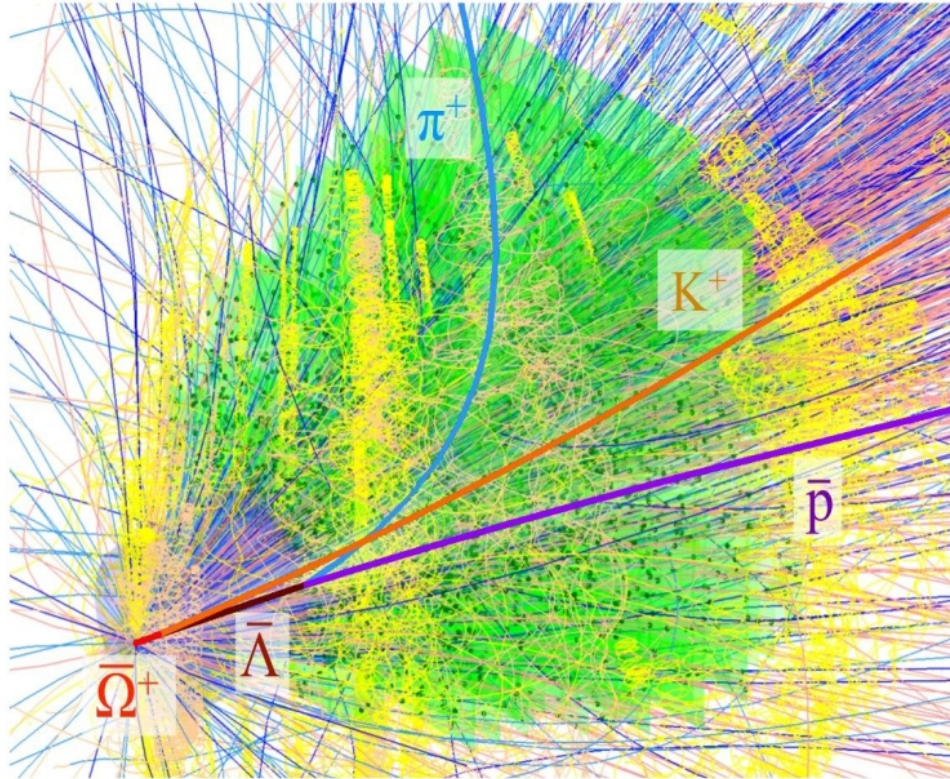
- Reconstrucción del tiempo de vuelo
  - Identificación de partículas basada en ML:
    - Un problema de clasificación multiclase

Precisión de la clasificación:  $p \sim 98\%$ ,  $\pi^+ \sim 92\%$ ,  $K^+ \sim 76\%$



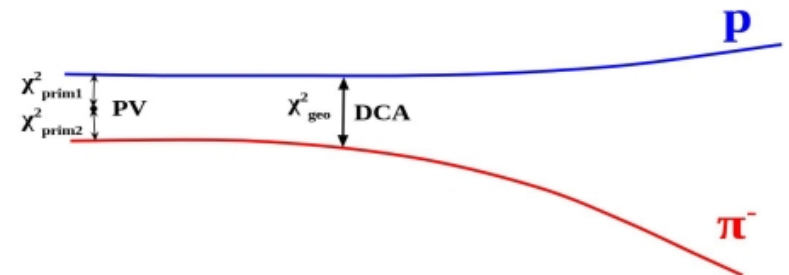
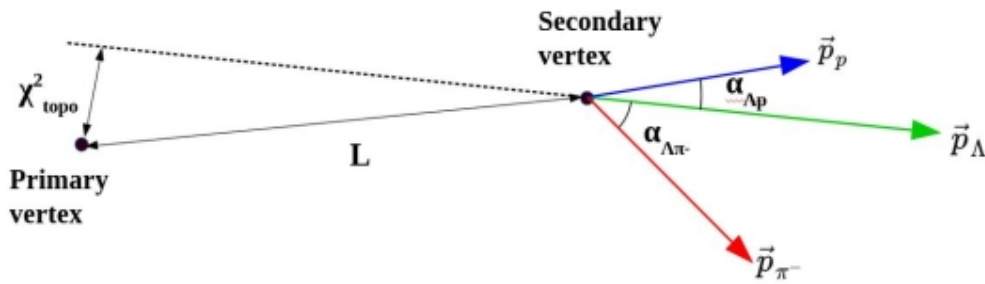
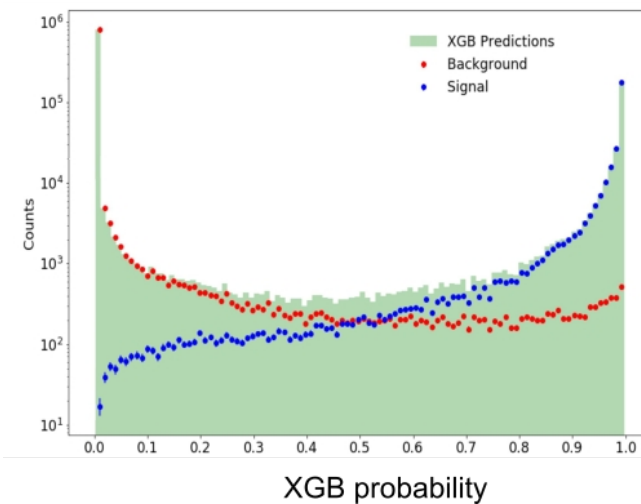
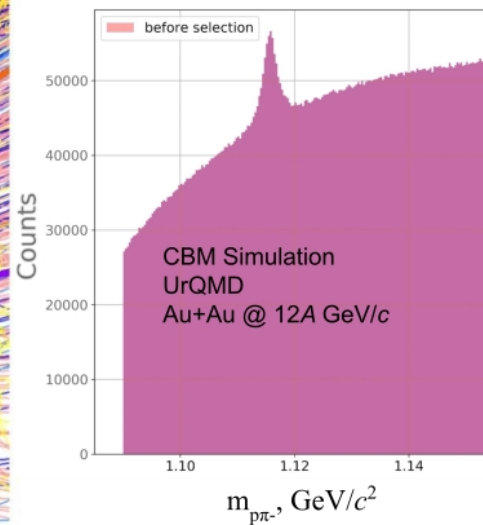
# Uso de ML : reconstrucción de eventos

- CBM simulación Au+Au colisiones @ 12 GeV/u



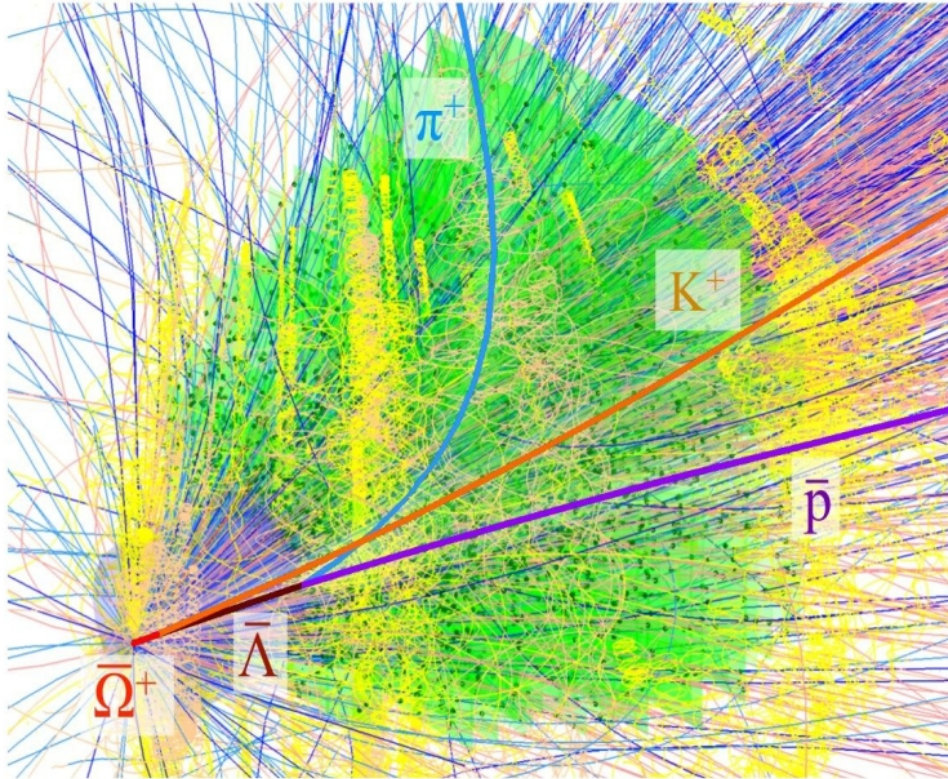
$\Lambda$  reconstrucción via  $\Lambda \rightarrow p+\pi^-$

Machine learning (XGBoost)

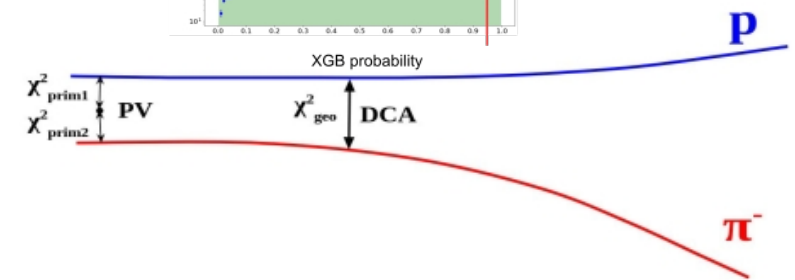
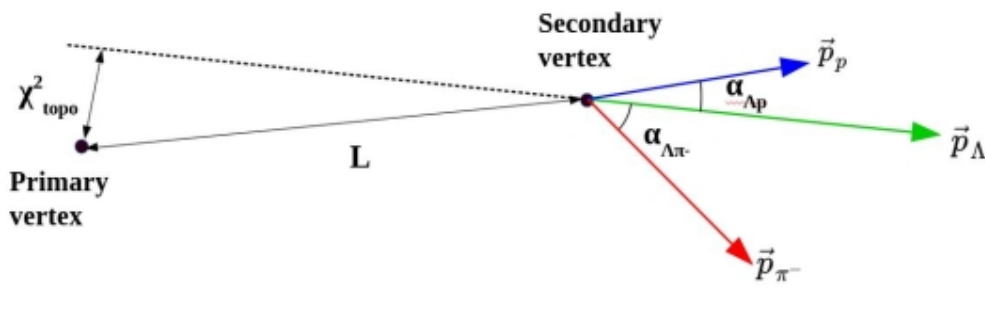
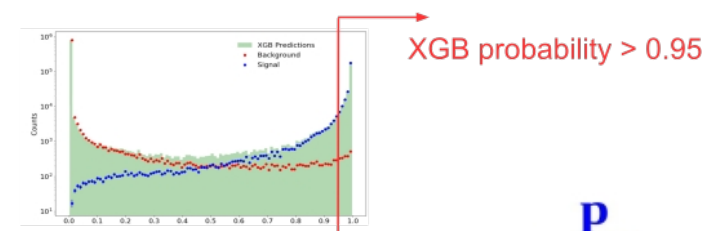
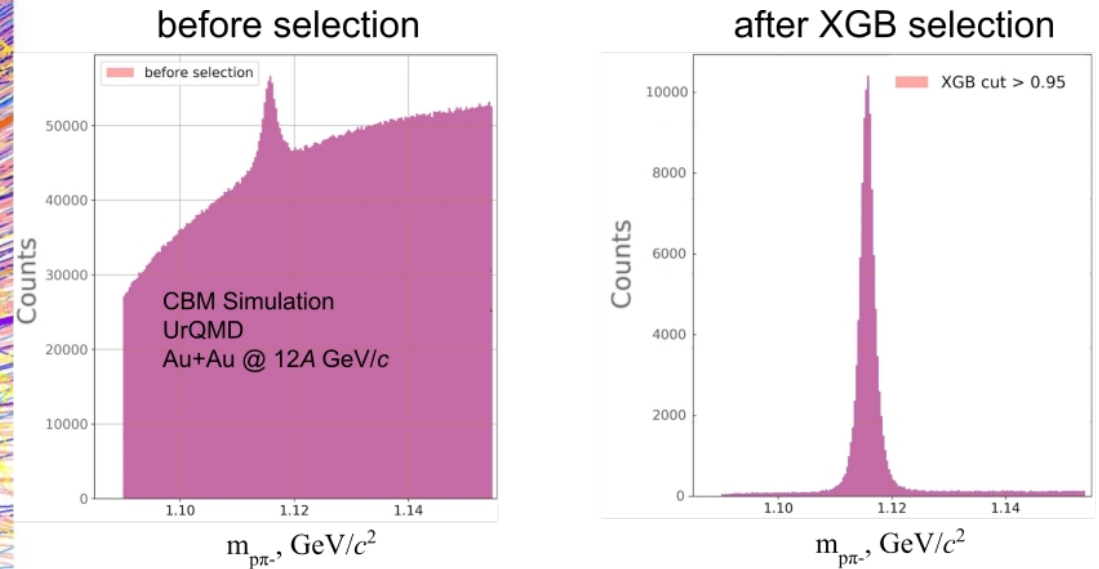


# Uso de ML : reconstrucción de eventos

- CBM simulación Au+Au colisiones @ 12 GeV/u

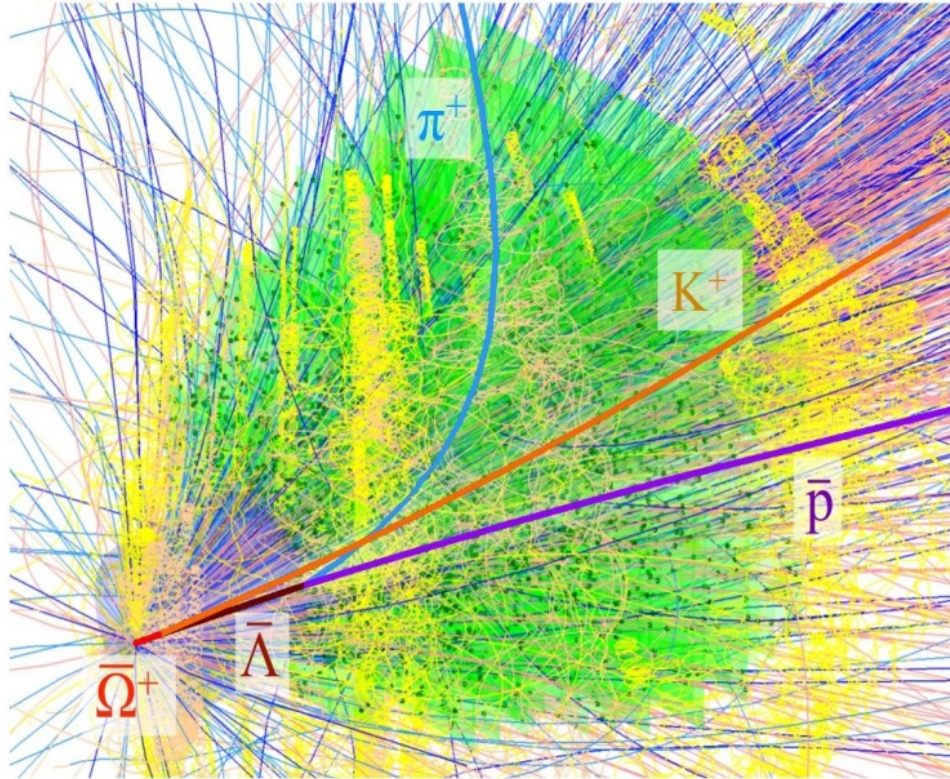


$\Lambda$  reconstrucción via  $\Lambda \rightarrow p+\pi^-$

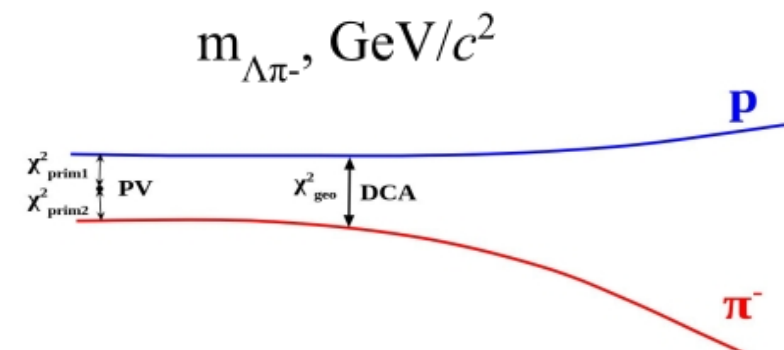
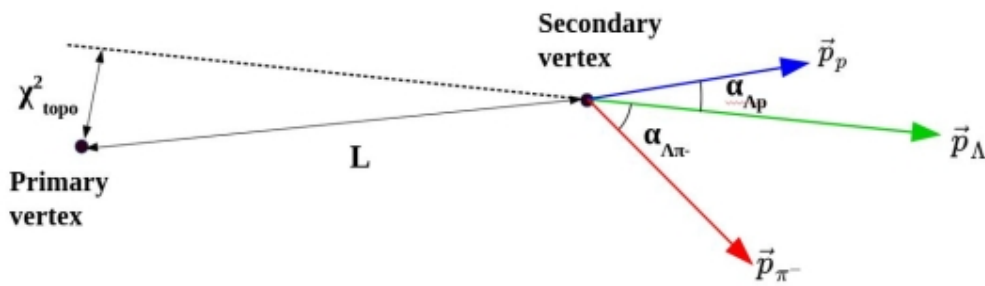
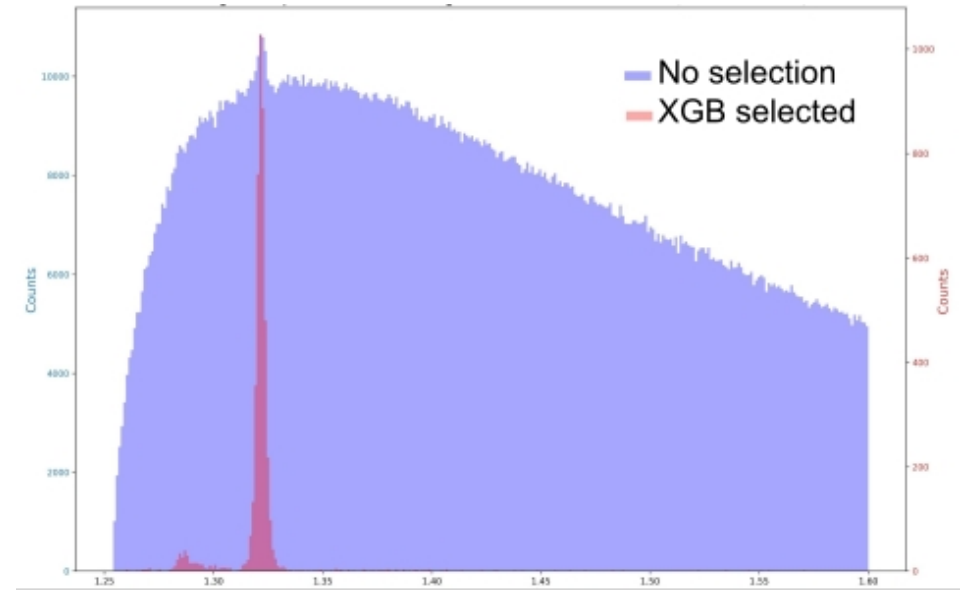


# Uso de ML : reconstrucción de eventos

- CBM simulación Au+Au colisiones @ 12 GeV/u

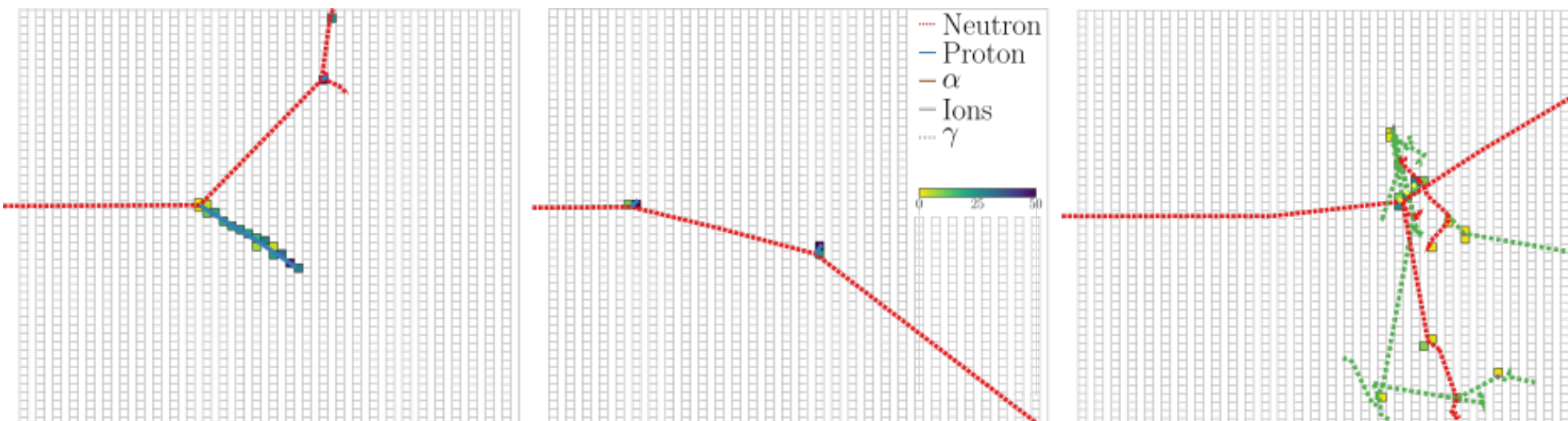
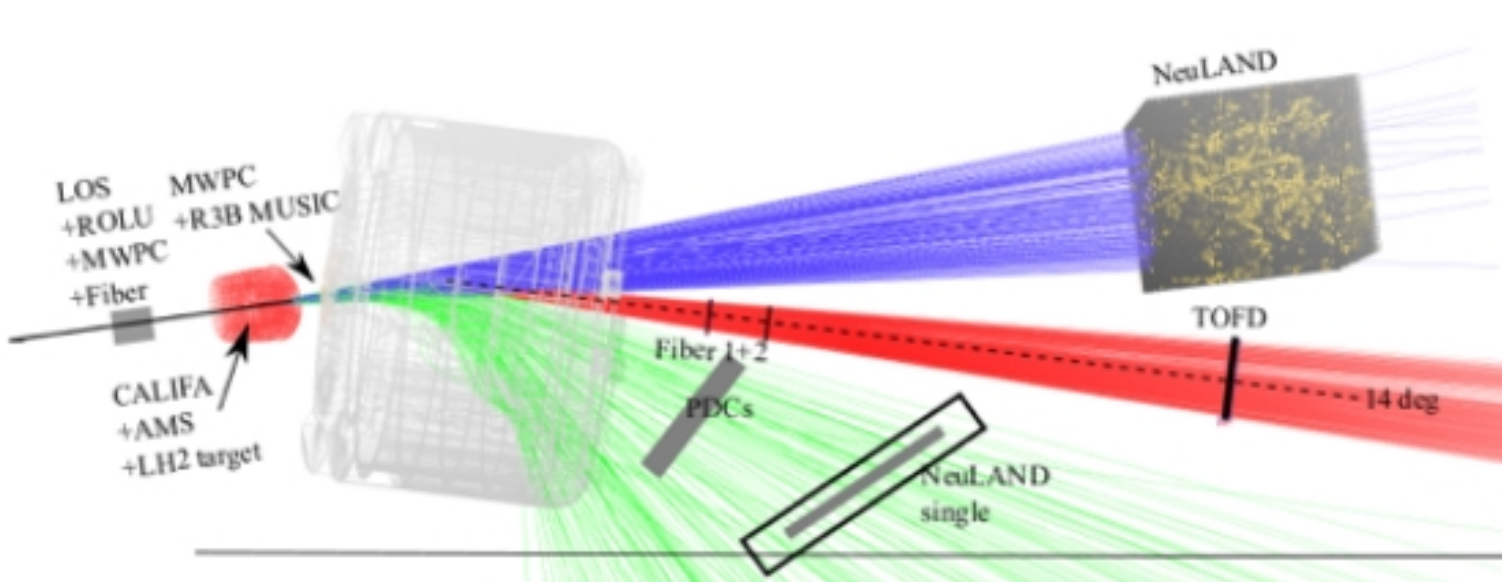


$\Xi^-$  reconstrucción via  $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$



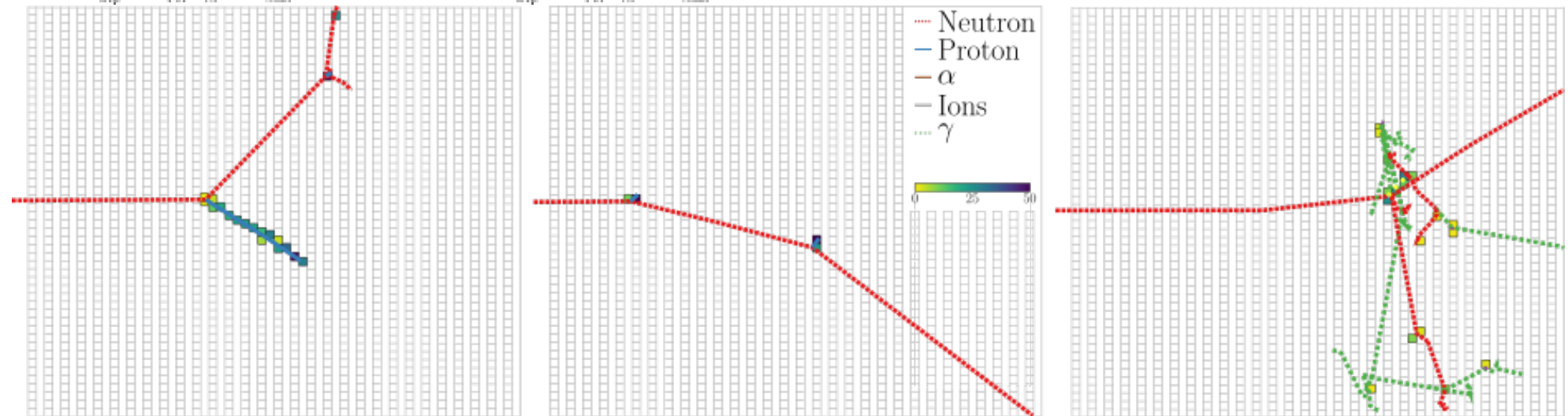
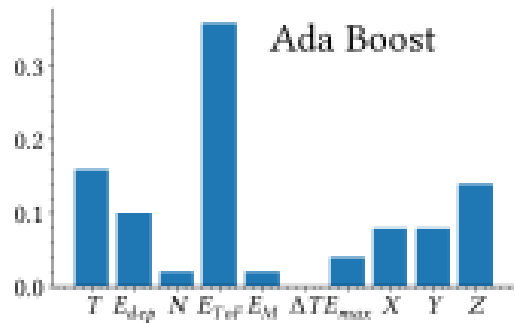
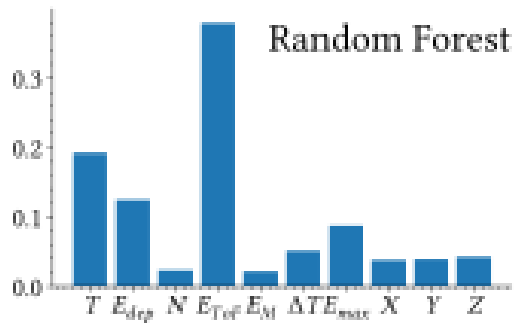
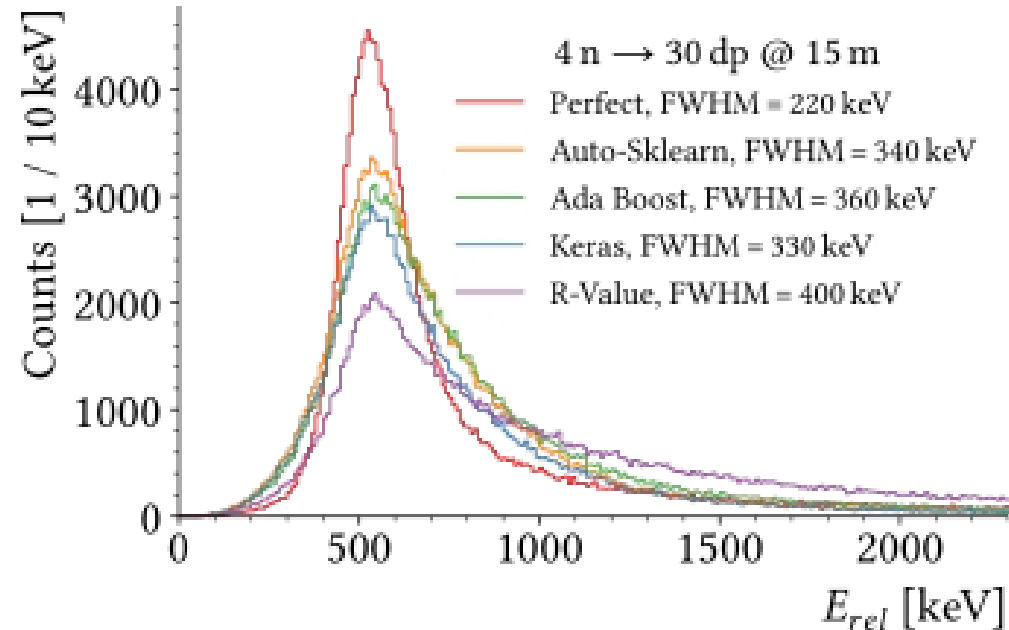
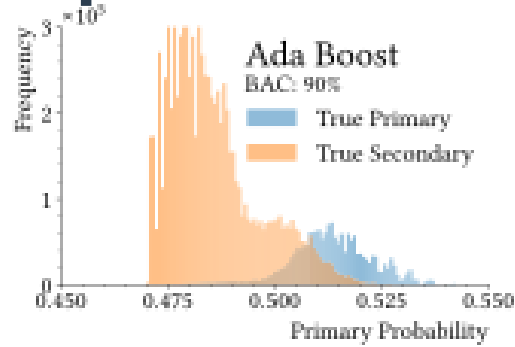
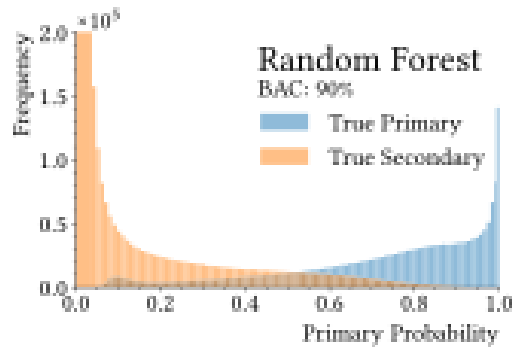
# Uso de ML : reconstrucción de eventos

- Neutrones rápidos en NeuLAND de R3B:



# Uso de ML : reconstrucción de eventos

## • Neutrones rápidos en NeuLAND de R3B:



# Puntos claves

- **GSI-FAIR, un programa en física nuclear ambicioso**
  - De un centro nacional a un internacional centro en Europa para la investigación en física nuclear
  - Ahora con el acelerador de iones de GSI y en 2025 con su expansión FAIR
  - Haces de iones pesados desde baja energía hasta alta energía
  - Muchas oportunidades para nuevas ideas y experimentos explorando territorio desconocido de la física nuclear
  - Con la complejidad experimental adicional, el uso de ML tiene un gran impacto !