



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea



ZTF-FCT  
Zientzia eta Teknologia Fakultatea  
Facultad de Ciencia y Tecnología

# **Aceleradores de Partículas: de los secretos del Universo a la vida cotidiana**

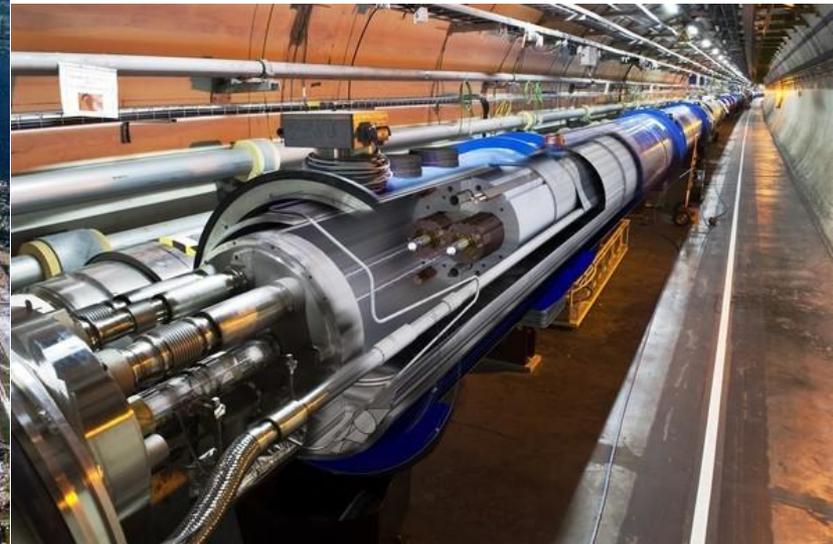
**Victor Etxebarria**

**Departamento de Electricidad y Electrónica  
Facultad de Ciencia y Tecnología, UPV/EHU**

24 de Abril 2019

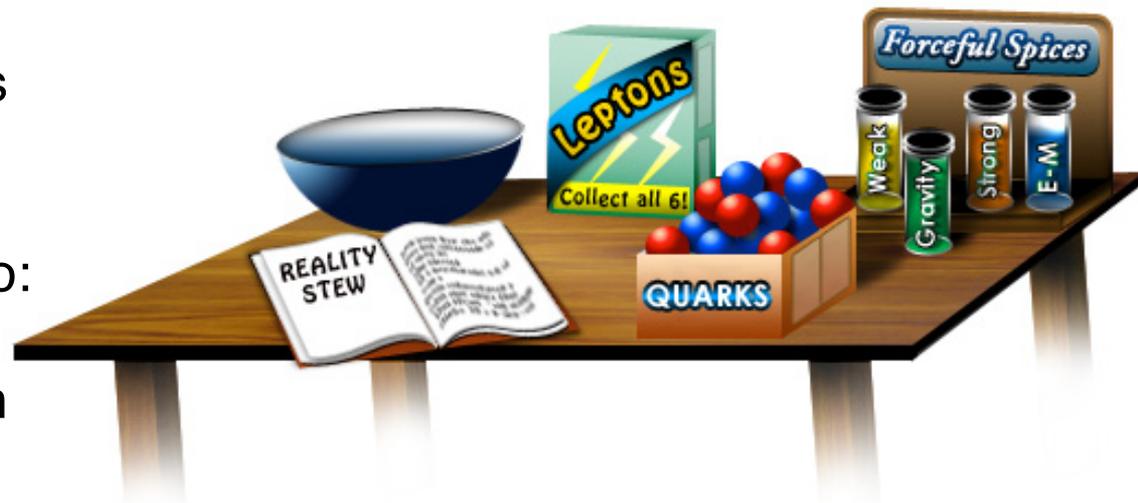
# Aceleradores de partículas: elementos centrales en la aventura de la ciencia

- Con excepción quizás de la exploración espacial, los aceleradores de partículas suponen el mayor esfuerzo colectivo científico-tecnológico de la Humanidad
- Interacción Ciencia – Tecnología (bidireccional)
- Grandes beneficios directos (ciencia, aplicaciones) e indirectos (www, computación paralela, detectores...)

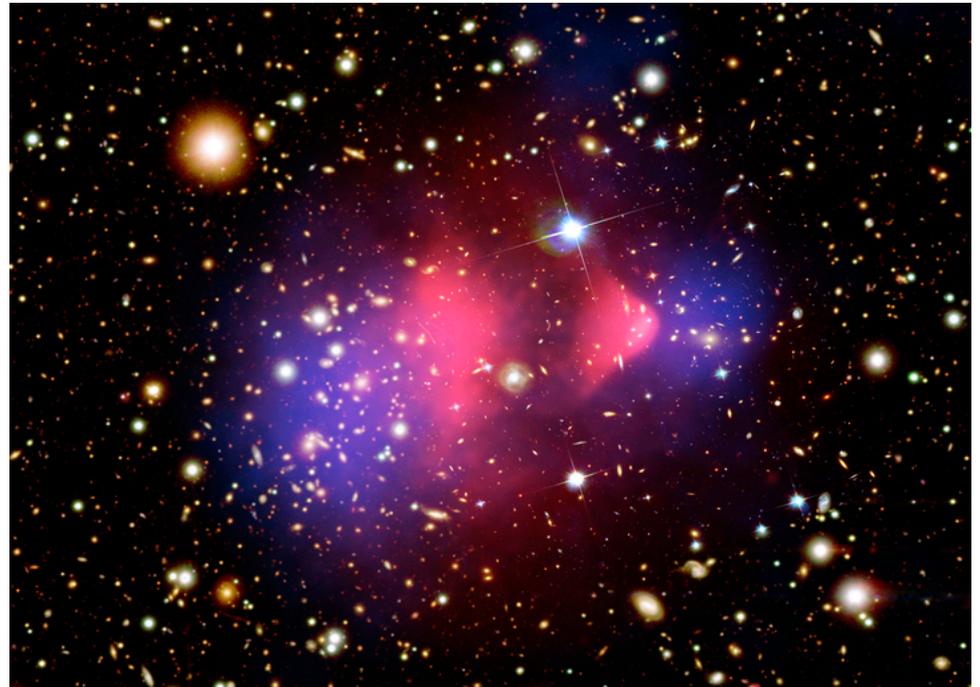


# Grandes aceleradores para ciencia básica

La motivación de los grandes aceleradores se encuentra principalmente en comprender nuestro Universo: ¿de que está hecho el mundo? ¿qué lo mantiene en “funcionamiento”?



- Ciencia de Partículas (lo más pequeño)
- Cosmología y Astrofísica nuclear (lo más grande)
- Leyes Fundamentales del Universo



# ¿Merece la pena la ciencia básica?

Argumento cultural y humanista: Conocer el sistema heliocéntrico, el código genético, cómo funciona el sol o la expansión del Universo enriquece nuestras vidas, mejora nuestra perspectiva de lo que somos y nos hace más humanos. La Curiosidad es esencia humana.

Comité del Congreso USA a Bob Wilson  
(primer director de Fermilab 1967):

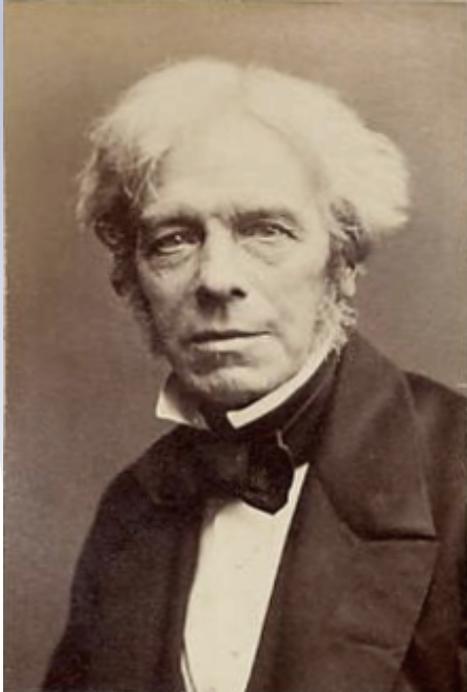
- *What will your lab contribute to the defence of the US?*
- *Nothing, but it will make it worth defending.*



Argumento práctico: la ciencia básica es el fundamento de todo progreso, es desarrollo para el futuro, tendrá impacto económico y mejorará la vida de las personas.

William Gladstone (British Chancellor of the Exchequer) a Michael Faraday en 1853:

- *What practical use is electricity?*
- *One day Sir, you may tax it.*



# ¿Merece la pena la ciencia básica?

I WAS JUST RUBBING STICKS TOGETHER FOR FUN  
- I DIDN'T REALIZE I WAS DOING BASIC RESEARCH.

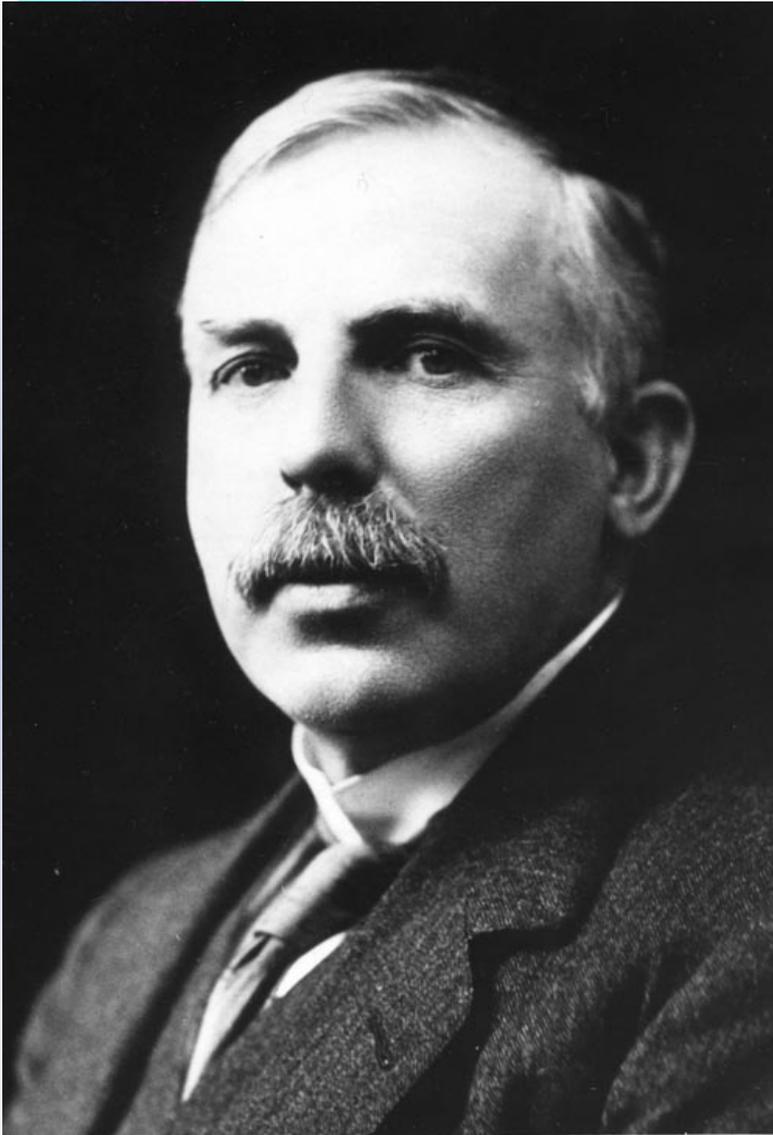


- Puntos en común en los ejemplos:
- Las aplicaciones del conocimiento básico se convirtieron en altamente rentables
  - Las aplicaciones no se previeron cuando se generó el conocimiento básico
  - Transcurrió mucho tiempo entre los descubrimientos fundamentales y su explotación
  - Los descubridores no se hicieron ricos

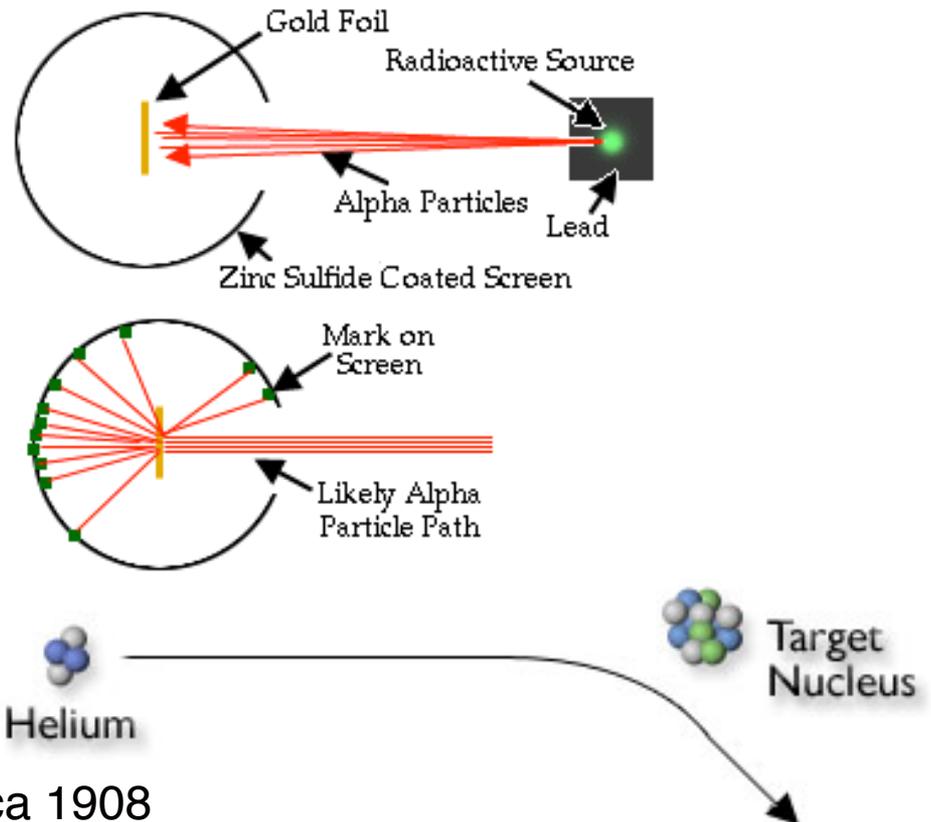
| Ejemplos Ciencia Básica   | Consecuencia   |
|---|--|
| Teoría cuántica del sólido (Sommerfeld, Bloch, Pauli etc.)                  | Transistor   |
| Núcleo atómico (Rutherford)<br>Contadores de partículas (Cockcroft, Walton) | Fuentes de energía<br>Circuitos básicos de computador    |
| Descubrimiento del electrón (Thompson)                                      | Electrónica  |
| Leyes electromagnéticas (Maxwell, Faraday, Hertz)                           | Motor eléctrico (inducción)<br>Comunicaciones (ondas em) |
| Algebra de Boole  | Tecnología digital                                       |



# Primeros pasos en ciencia de partículas

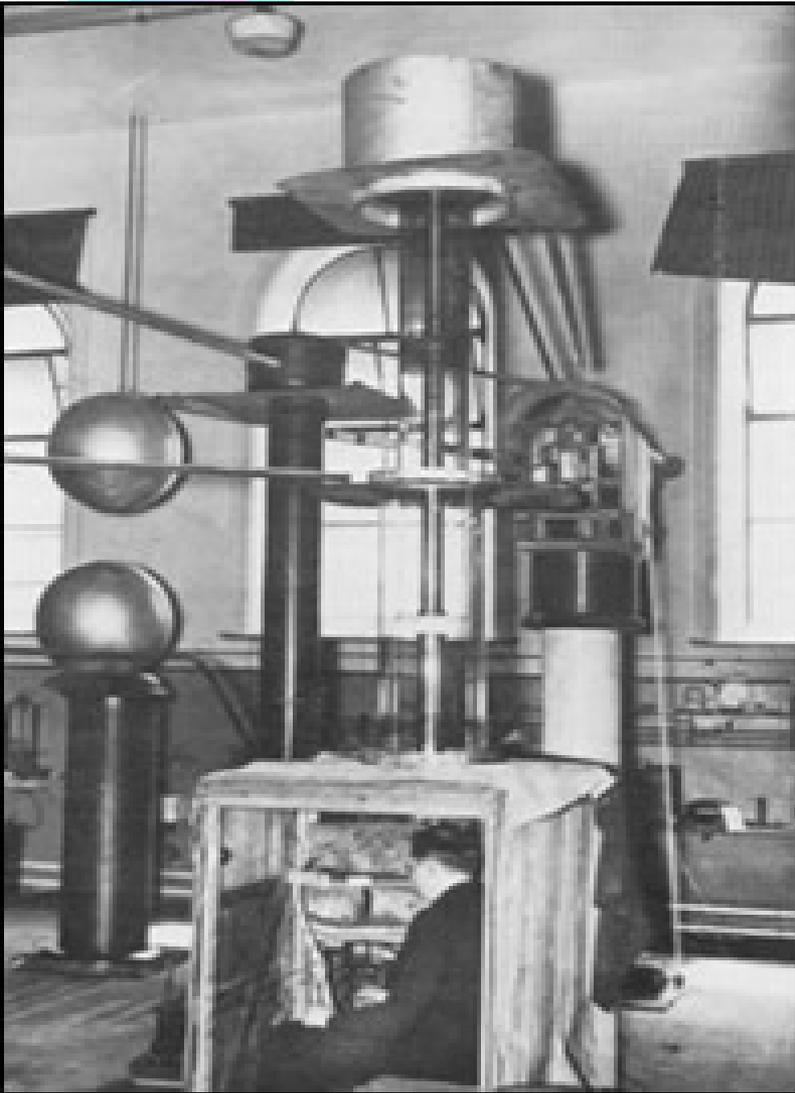


Hace más de un siglo Ernest Rutherford demostró cuánto se podía aprender colisionando partículas. El no tenía aceleradores, usó una fuente de partículas alfa y descubrió el Nucleo Atómico.



Ernest Rutherford, Premio Nobel Quimica 1908

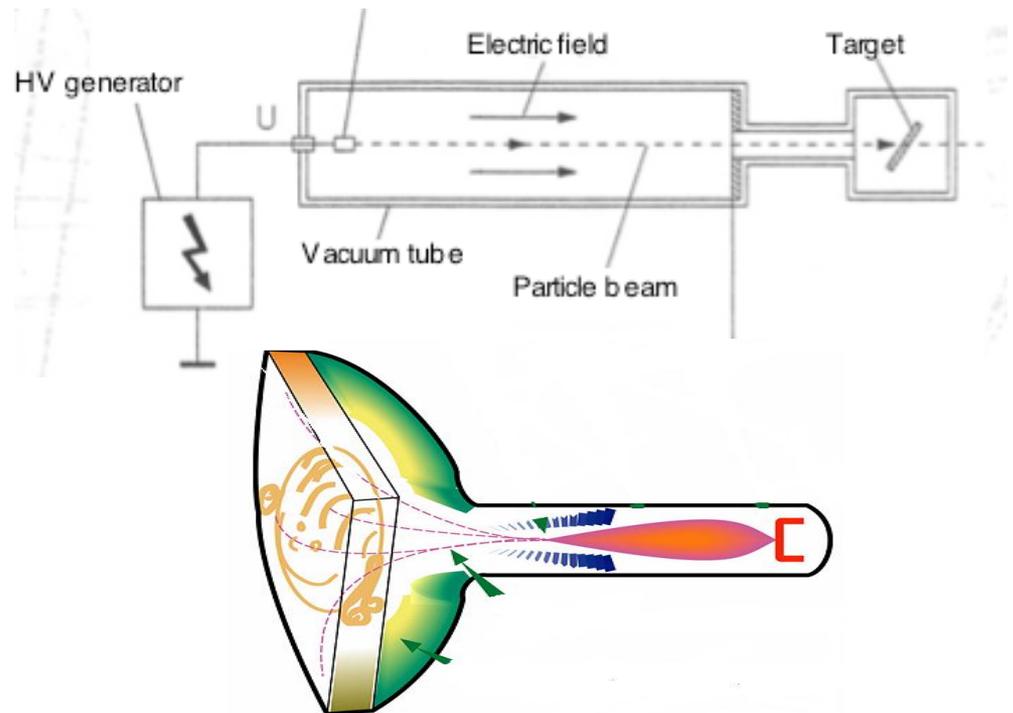
# Acelerador de Cockcroft - Walton



Los alumnos de Rutherford, John Cockcroft y Ernest Walton (graduados en Ing. Eléctrica y Matemáticas) aceleraron protones en un tubo de alta tensión (700kV), en el legendario Laboratorio Cavendish de Cambridge, fundado por J.C. Maxwell. (1932)

Con ello consiguieron romper nucleos de Litio y obtener nucleos de Helio. Premio Nobel Física 1952.

Se trata de un acelerador electrostático, parecido a una TV de tubo.



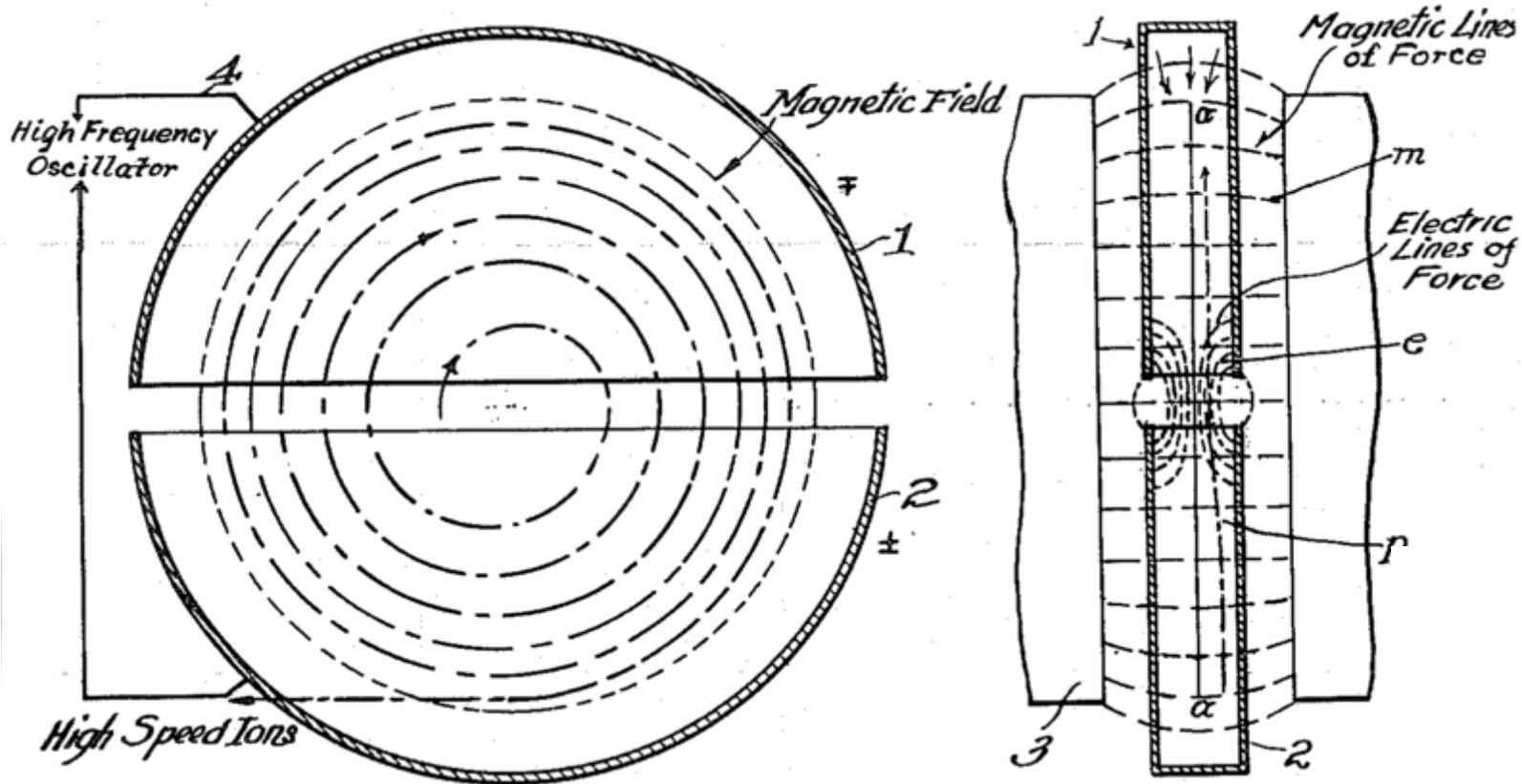
Walton and the machine used to "split the atom"

# Ciclotrón de Ernest Lawrence



Ernest Lawrence inventó el ciclotrón en el Rad Lab de la U. de Berkeley. Ahora este laboratorio es el Lawrence Berkeley National Laboratory, cuya plantilla la forman más de 4000 personas

# Ciclotrón de Ernest Lawrence

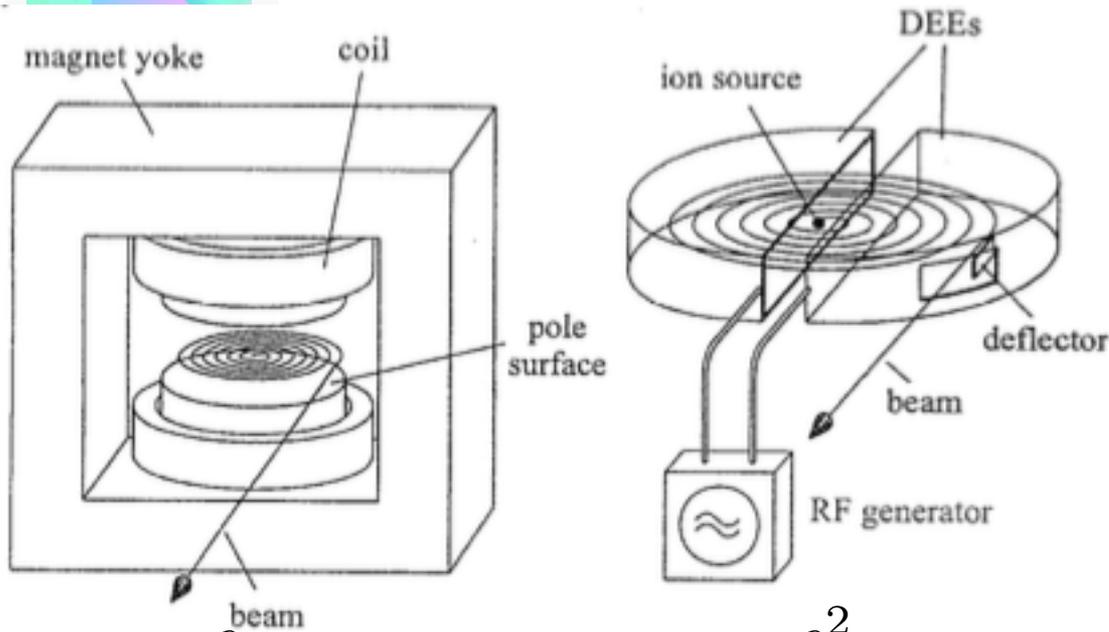


Esquema de la patente original de Lawrence (1934),  
y primer ciclotrón (diámetro 13 cm)

Premio Nobel de Física 1939



# Ciclotrón de Ernest Lawrence



$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{p} = m \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \dot{\mathbf{p}} = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Dos mov. armonicos simples seno y coseno acoplados (mov. circular) con frecuencia

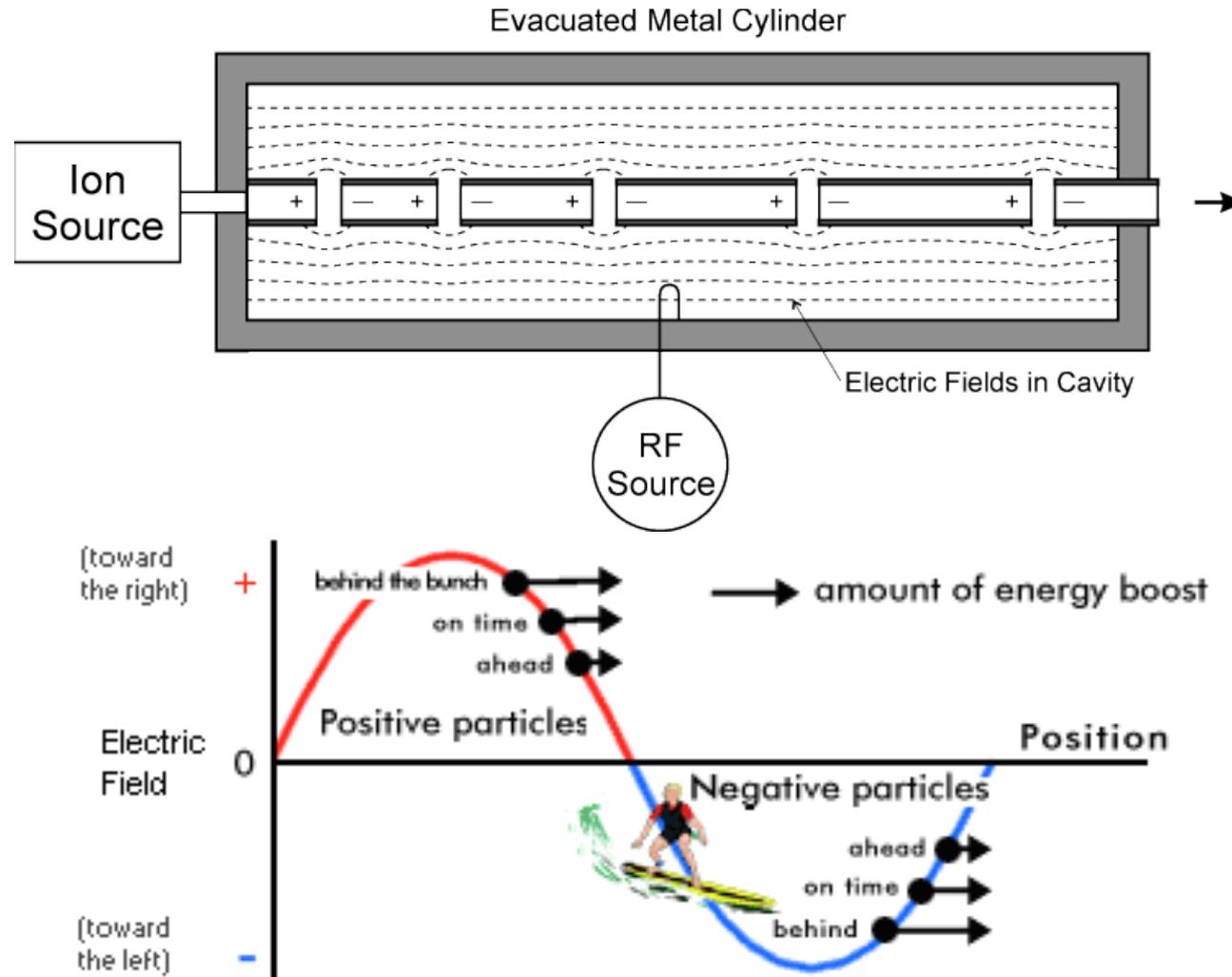
$$\dot{v}_x = \frac{e}{m} B_z v_y \implies \ddot{v}_x = -\frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_x$$

$$\dot{v}_y = -\frac{e}{m} B_z v_x \implies \ddot{v}_y = -\frac{e^2}{m^2} B_z^2 v_y$$

$$\omega_z = \frac{e}{m} B_z$$

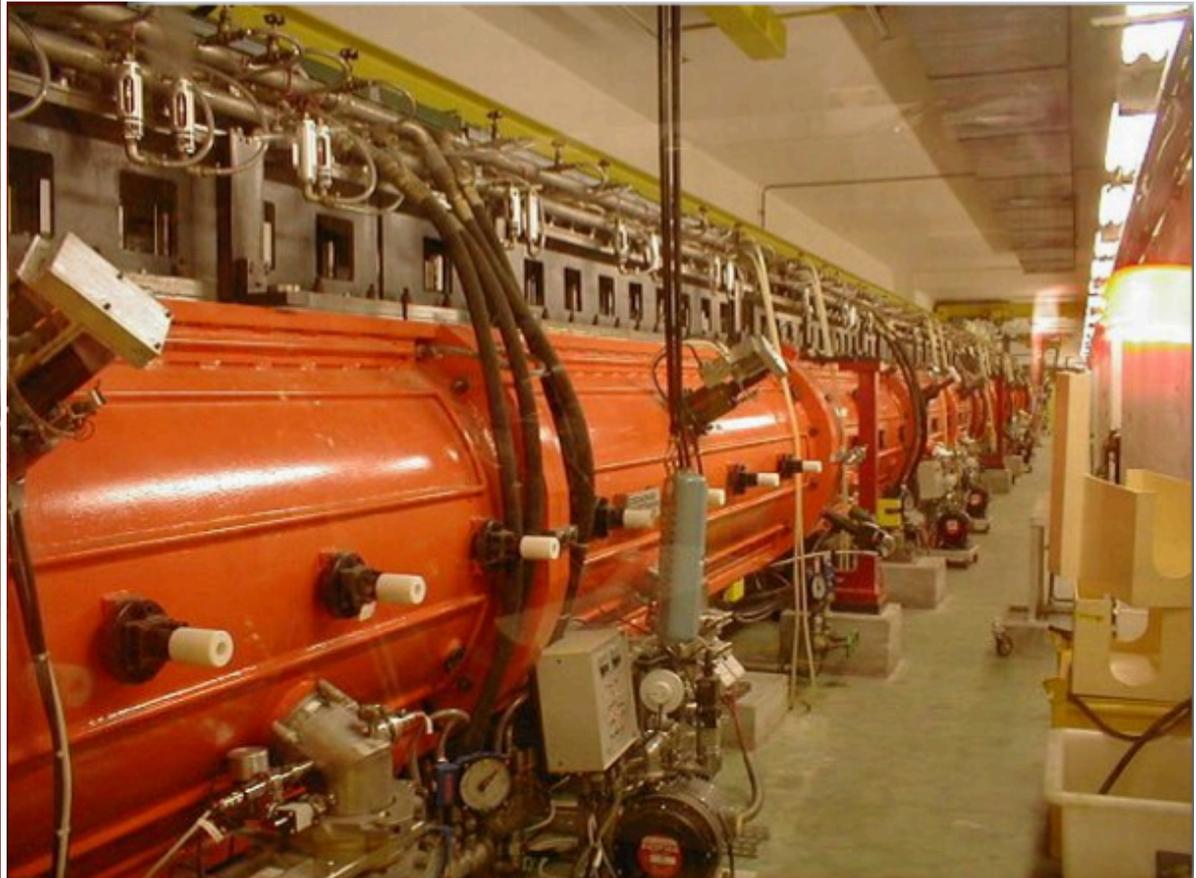
El generador RF  $\omega_{RF} = \omega_z$  (frecuencia ciclotrón). Solo depende de la relación carga-masa de la partícula. Para partículas no relativistas,  $m$  constante,  $B$  constante, fácil de implementar. Si no, o bien hay que bajar  $\omega_{RF}$  a medida que se adquiere energía (sincrociclotrón) o bien se aumenta  $B$  a medida que se adquiere energía (isociclotrón).

# El LINAC de tubos de deriva de Luis Alvarez



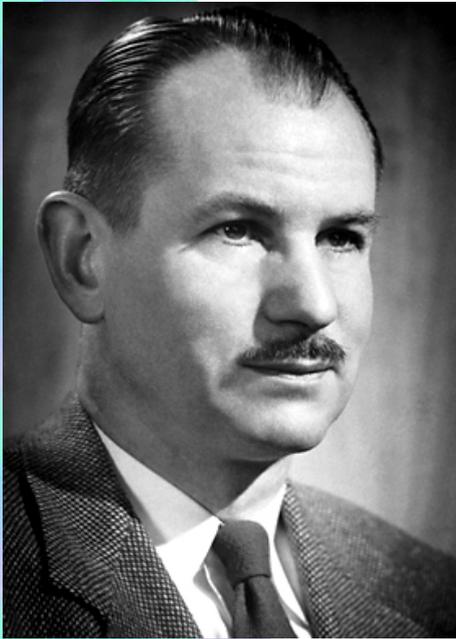
Luis W. Alvarez trabajó en el mismo Rad Lab de Berkeley de Ernest Lawrence, y empleó tecnología de radar para inventar el Drift-Tube Linac (1946)

# El LINAC de tubos de deriva de Luis Alvarez

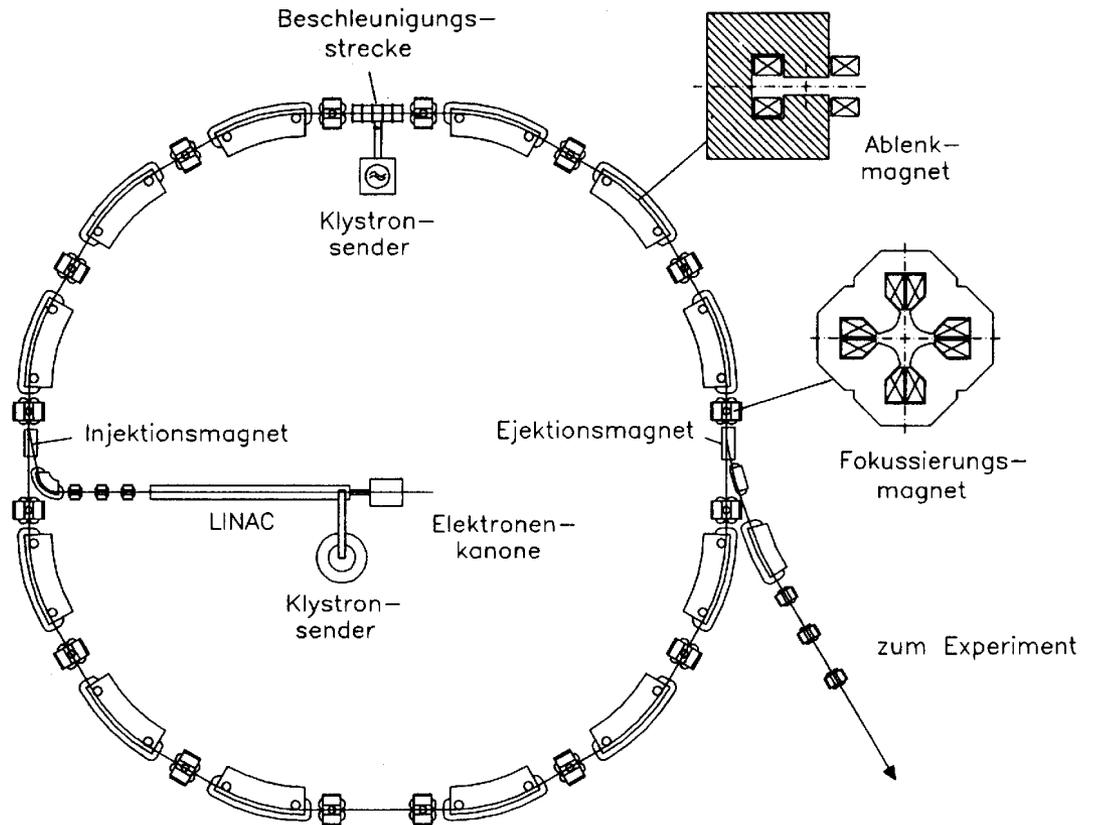


El DTL se utiliza en gran parte de los aceleradores actuales (Linac 2 CERN)  
Alvarez, Premio Nobel Física 1968.

# El sincrotrón

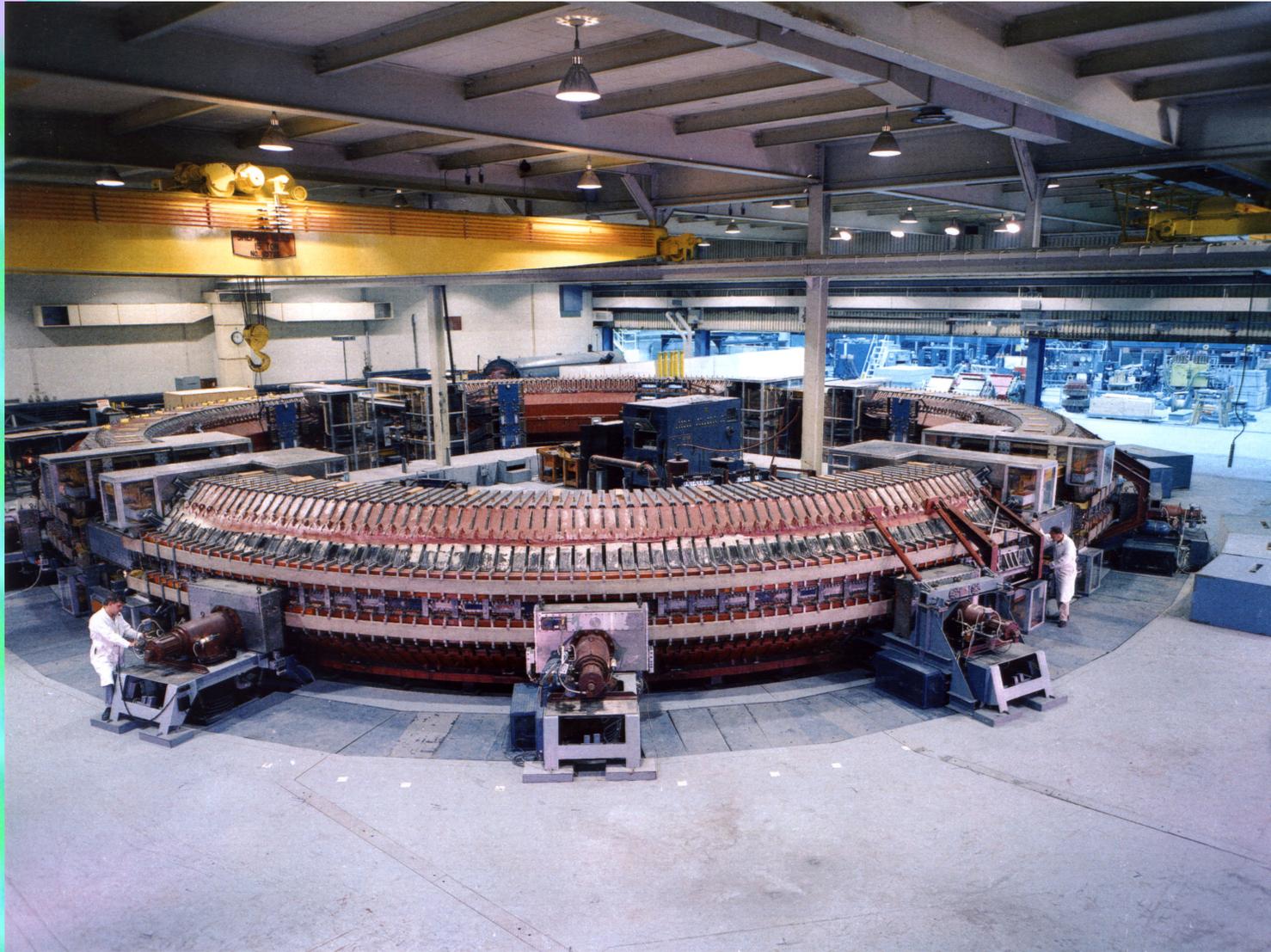


Edwin McMillan, Rad Lab Berkeley, construyó el primer sincrotrón de electrones en 1949. Premio Nobel Química 1951



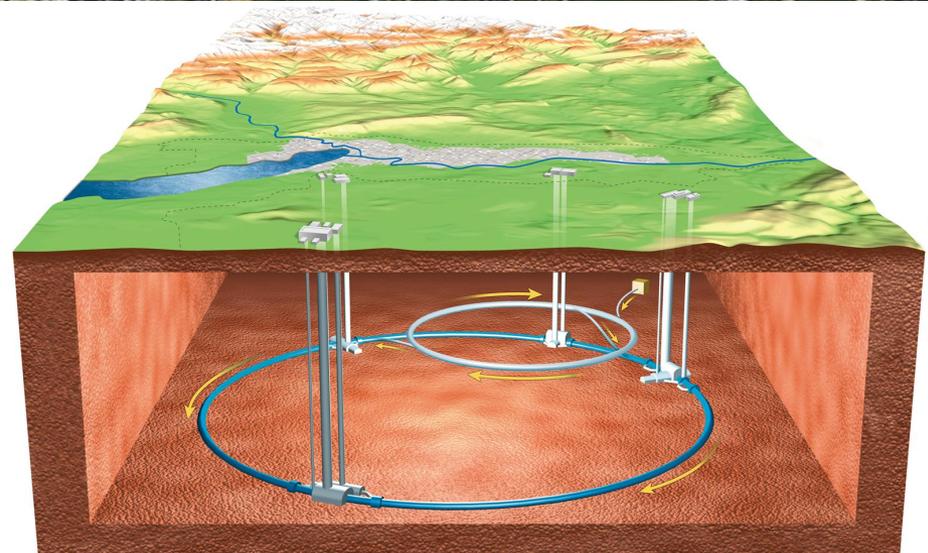
El sincrotrón es un acelerador circular que como el DTL de Alvarez utiliza tecnología de radar para generar campos electricos acelerantes, y usa campos magneticos para curvar la trayectoria, como en ciclotrón. En este caso, los campos magnéticos deben crecer **síncronamente** con el aumento de energía de las partículas.

# El sincrotrón

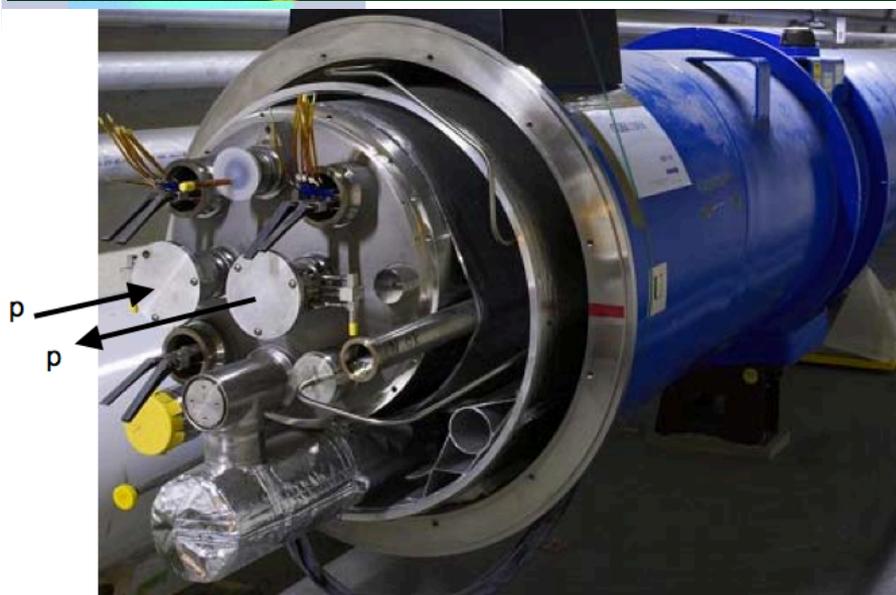
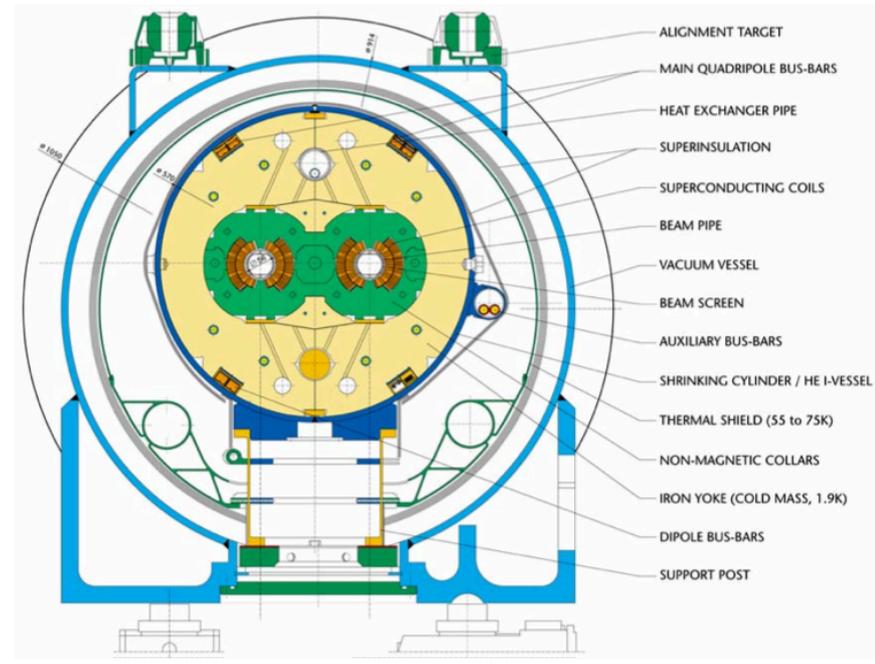
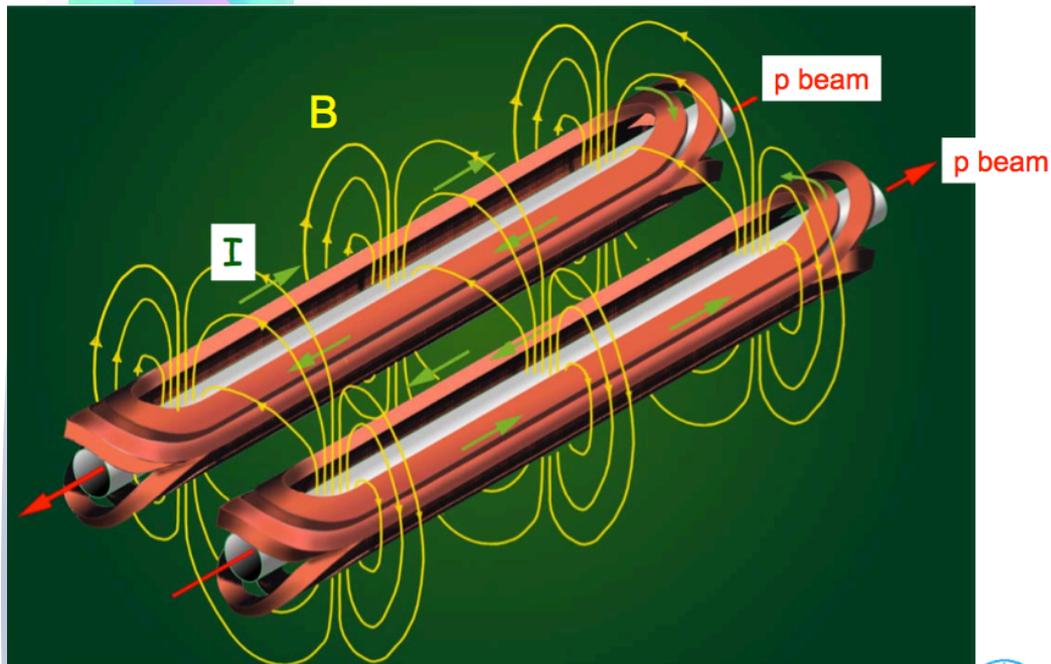


El Cosmotron (1953), uno de los primeros sincrotrones (Brookhaven).

# El Large Hadron Collider (LHC) CERN



# El Large Hadron Collider (LHC) CERN



# El Modelo estándar

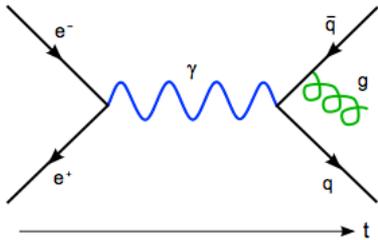
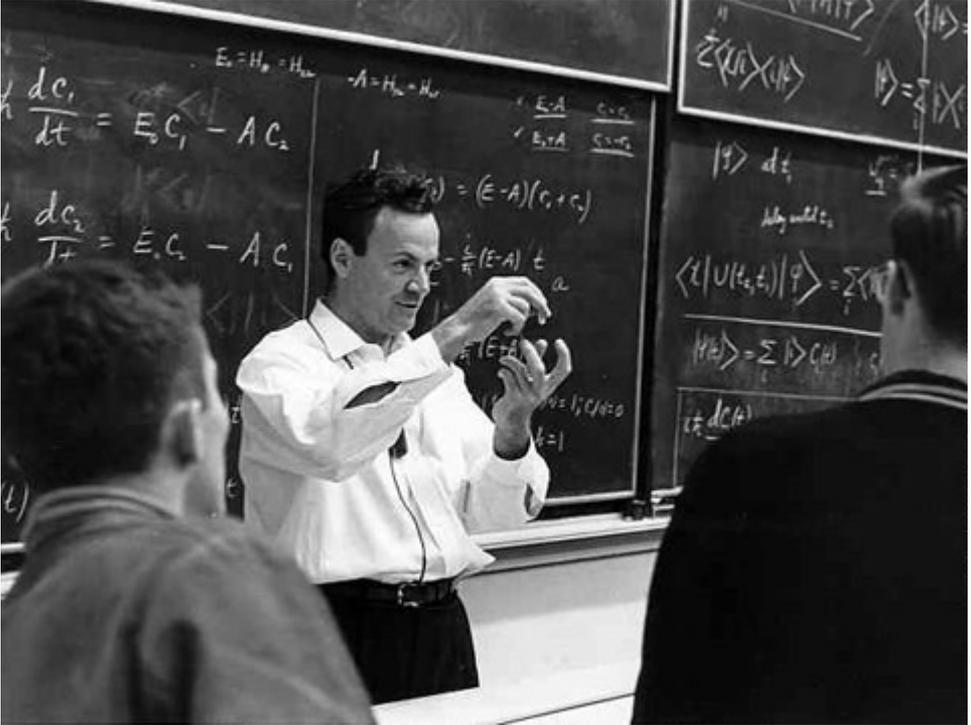
## THE STANDARD MODEL

|         | Fermions                                  |                                       |                                      | Bosons              |                |
|---------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------|
| Quarks  | <b>u</b><br>up                            | <b>c</b><br>charm                     | <b>t</b><br>top                      | <b>γ</b><br>photon  | Force carriers |
|         | <b>d</b><br>down                          | <b>s</b><br>strange                   | <b>b</b><br>bottom                   |                     |                |
| Leptons | <b>ν<sub>e</sub></b><br>electron neutrino | <b>ν<sub>μ</sub></b><br>muon neutrino | <b>ν<sub>τ</sub></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson |                |
|         | <b>e</b><br>electron                      | <b>μ</b><br>muon                      | <b>τ</b><br>tau                      | <b>g</b><br>gluon   |                |

**Higgs\***  
boson

\*Yet to be confirmed

Source: AAAS



Aniquilación electrón positrón

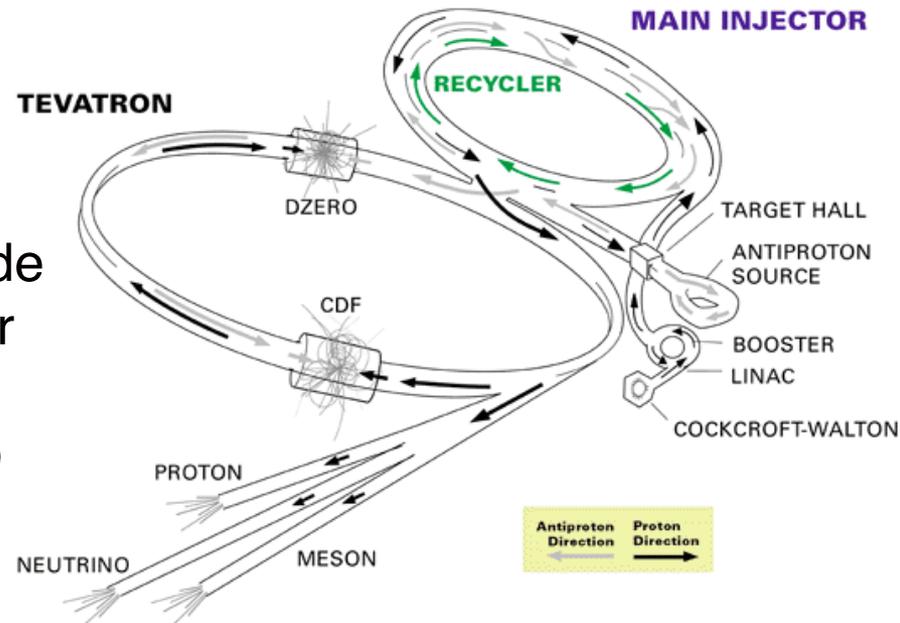
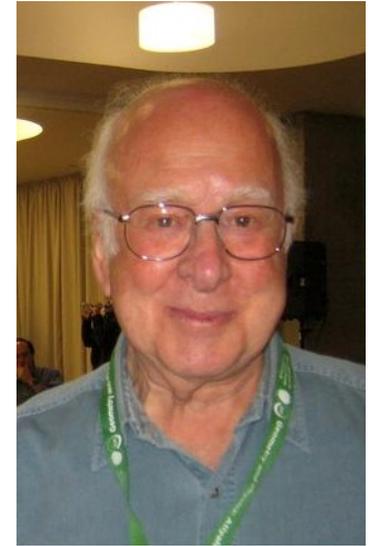
Richard P. Feynman: “The pleasure of finding things out”.

# El Higgs

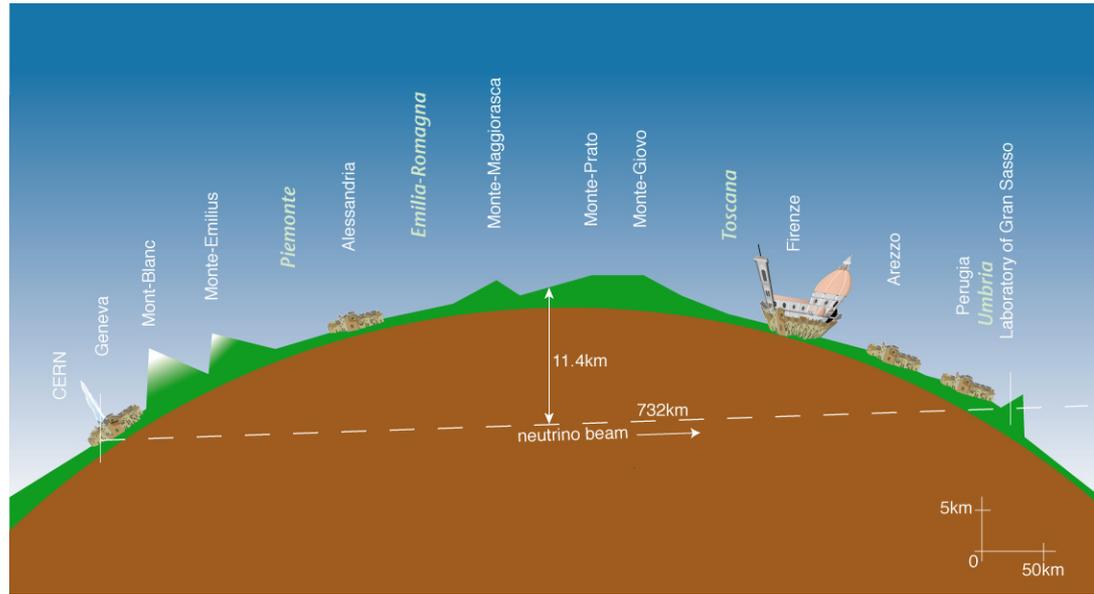
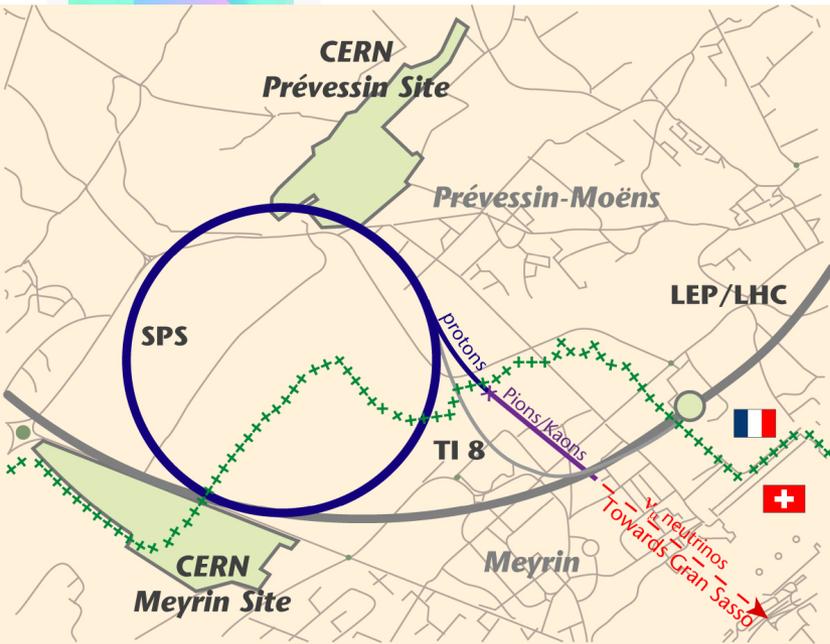
El modelo estándar predice la existencia de un campo (similar a otros campos como los campos eléctricos, magnéticos o gravitatorios). Se trata de un campo casi indistinguible del espacio vacío. Este campo se llama el campo de Higgs, (por Peter Higgs).

Los físicos piensan que todo el espacio está lleno de campo de Higgs, y que interaccionando con este campo, las partículas adquieren masa. Las partículas que interaccionan fuerte con el campo de Higgs son pesadas, y las que interaccionan débilmente son ligeras.

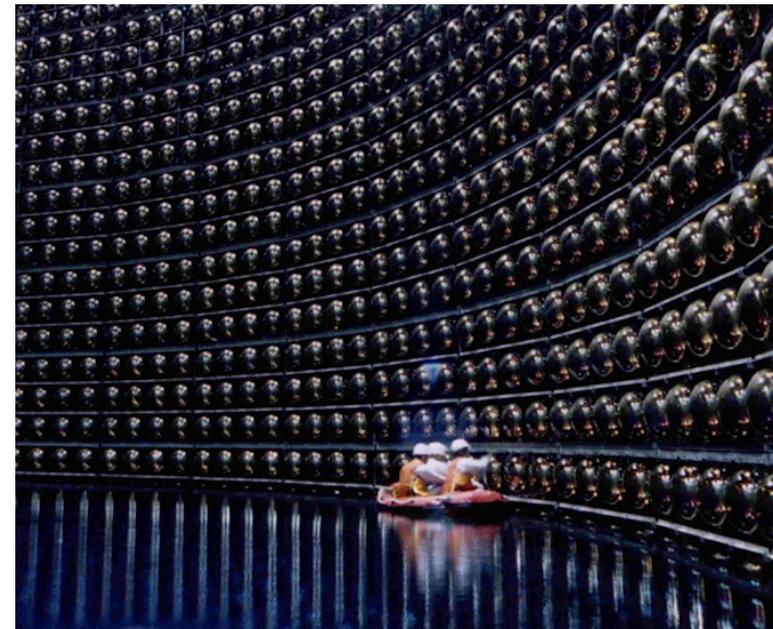
El campo de Higgs debería tener una partícula asociada con él, la partícula de Higgs, que Leon Lederman (ex director de Fermilab) llamó "The God Particle". Fue detectada en 2012 y Higgs recibió el Premio Nobel en 2013.



# Neutrinos



Se toman protones en el SPS, se colisionan con un blanco de grafito, para obtener kaones y piones, que decaen en muones y neutrinos mu. Un segundo blanco detiene todo menos los neutrinos, que no interaccionan apenas con la materia, y viajan 732 km por la corteza de la Tierra.

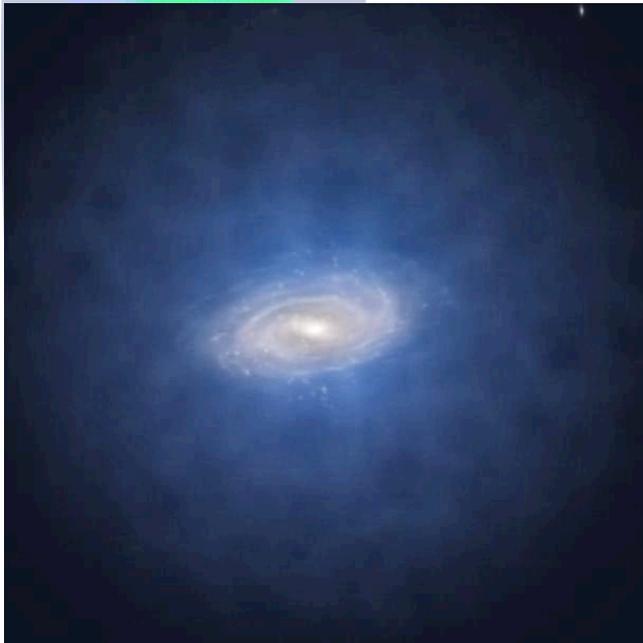


# Materia oscura

De cuando en cuando, una nueva idea científica viene a desafiar la forma de pensar de la ciencia. Un ejemplo de esto es por ejemplo la observación de Copérnico de que la Tierra no era el centro del Universo.



Los científicos recientemente han llegado a otra conclusión que cambia radicalmente la concepción del Universo, cuando se dieron cuenta de que la mayoría del Universo no está hecho del mismo tipo de materia que la Tierra (y nosotros). De efectos gravitatorios que observan los astrónomos, puede inferirse la existencia de esta “materia oscura”, un tipo de materia que no podemos ver, y que no se compone de protones, neutrones y electrones, como nosotros. No sabemos qué es la materia oscura: los físicos creen que está compuesta de neutrinos o bien de otros tipos de materia exótica hipotética de la que aún no sabemos nada. El LHC busca también WIMP (Weakly interacting massive particles).



# Aceleradores en la vida cotidiana

Hay más de 20.000 aceleradores en el mundo: sólo el 1% son grandes instalaciones de “ciencia pura”.

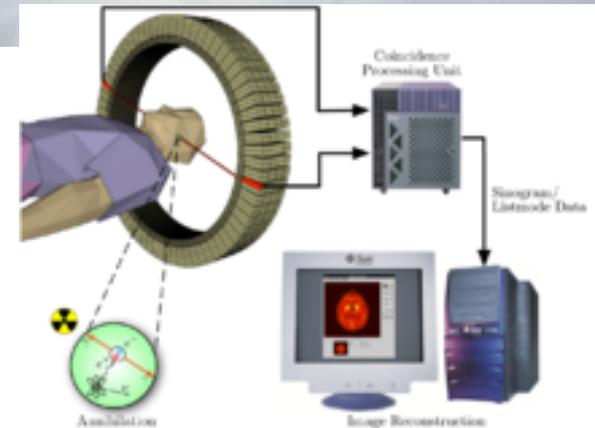
| <b>Tipo de Acelerador</b>                              | <b>Numero</b>     |
|--|-------------------|
| Ciencia de partículas y alta energía                   | ~120              |
| Fuentes de radiación sincrotrón                        | ~120              |
| Producción de radioisótopos médicos                    | ~200              |
| Aceleradores para radioterapia                         | ~9.000            |
| Aceleradores para investigación (incluyendo biomédica) | ~1.000            |
| Aceleradores para procesado industrial e investigación | ~1.500            |
| Implantación de iones y tratamiento de superficies     | ~9.000            |
| <b>TOTAL</b>   | <b>&gt;20.000</b> |

La mayoría de los aceleradores en operación se utilizan para mejorar la vida de las personas, con aplicaciones muy lejos de la cosmología, la física teórica o las Leyes fundamentales del Universo.

# Medicina y radiofarmacia



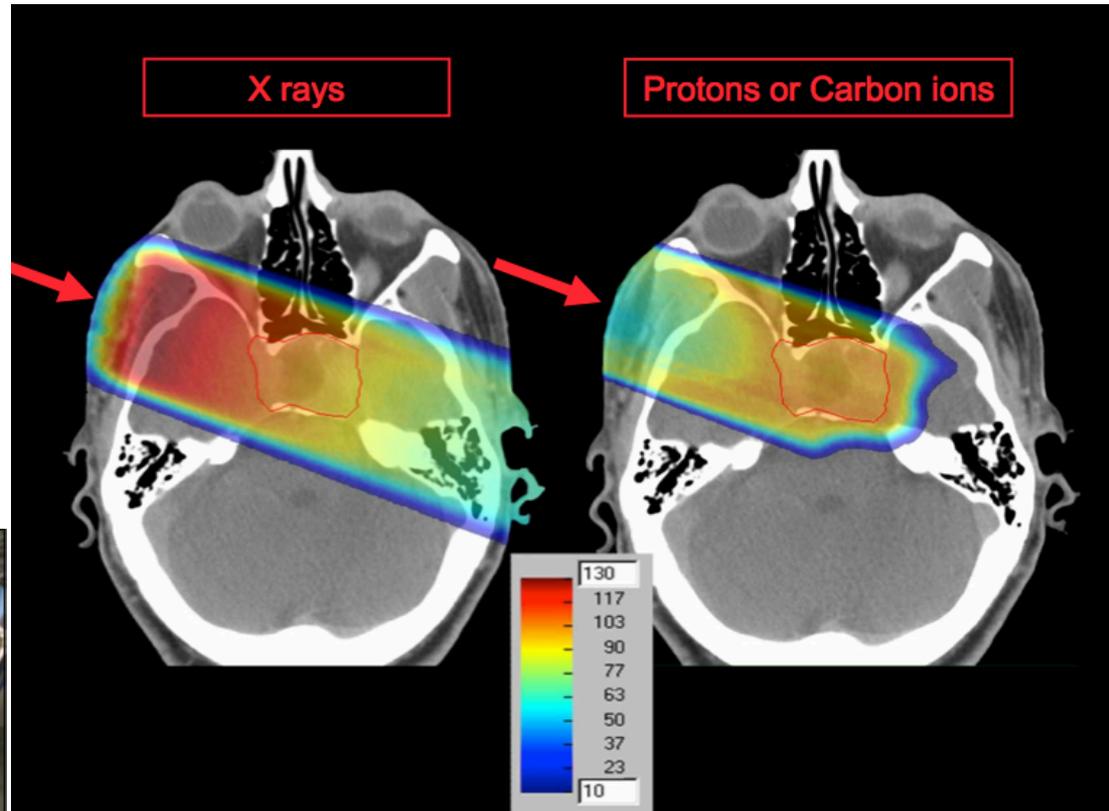
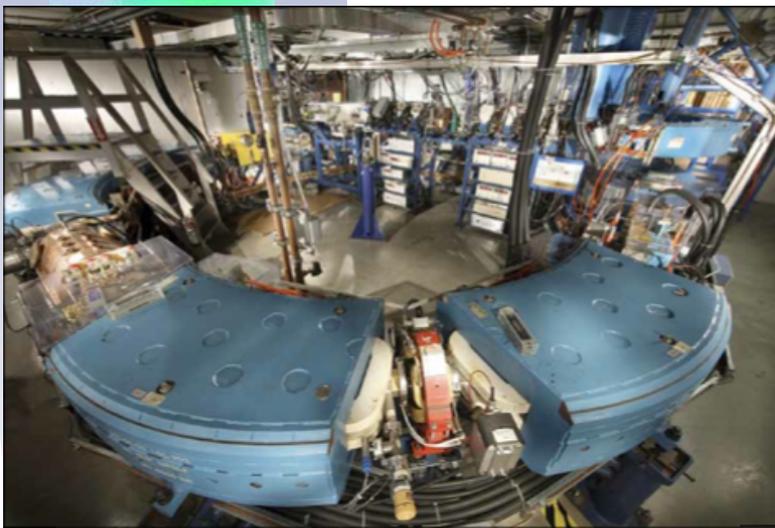
IMAGE COURTESY OF VARIAN MEDICAL SYSTEMS OF PALO ALTO, CALIFORNIA. ©2009 VARIAN MEDICAL SYSTEMS. ALL RIGHTS RESERVED.



Los tratamientos de radioterapia se realizan con aceleradores de electrones: **Bremsstrahlung**

Tomografía por emisión de positrones (PET-TAC). Radiofármacos como F18, se crean en ciclotrones de protones. Otros como Mo99, con neutrones

# Terapia protónica

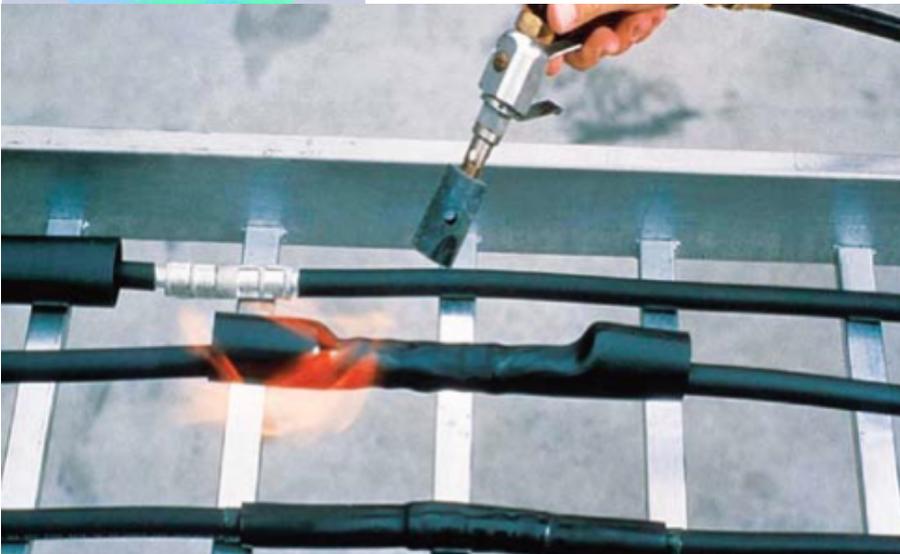


Sincrotrón de protones construido por Fermilab para el Centro de Terapia Protónica Loma Linda (California)

# Irradiación de materiales

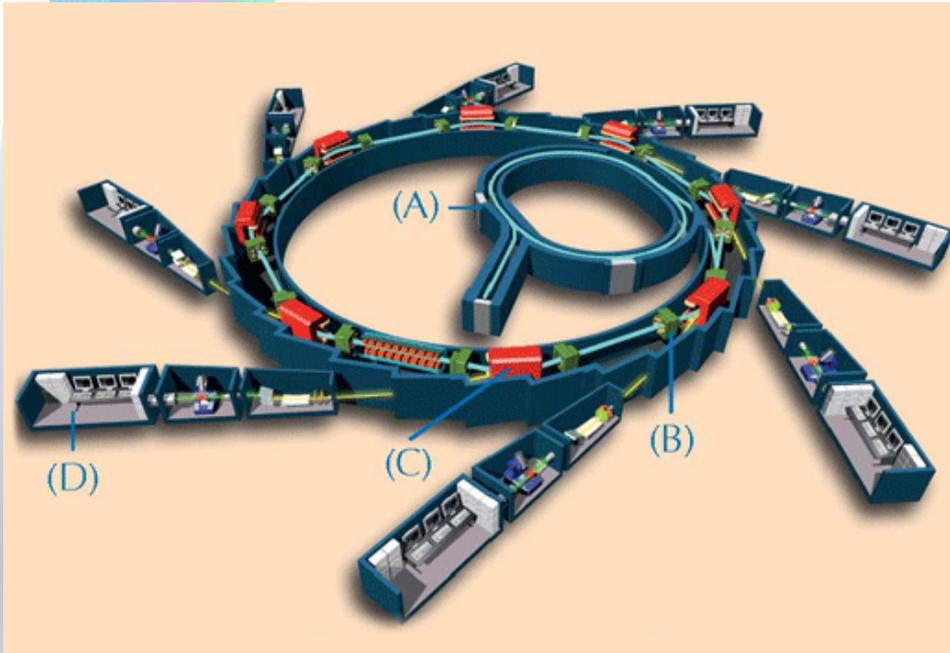


Esterilización por haz de electrones en propio empaquetado: comida, suministros médicos...

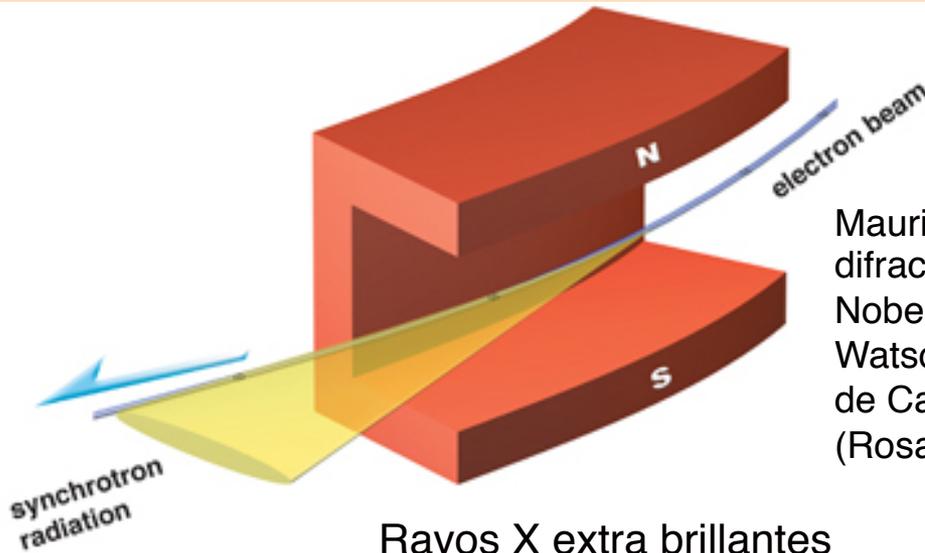


Tratamiento por haz de electrones de tubo de polietileno, para transformar sus propiedades y dotarlo de memoria de forma. Tubos de material al calentarse no se funde, sino que se encoge hasta 4 veces y protege todo tipo de cables (usados en automoción, aeronautica, trenes, electrónica de consumo...).

# Fuentes de luz sincrotrón

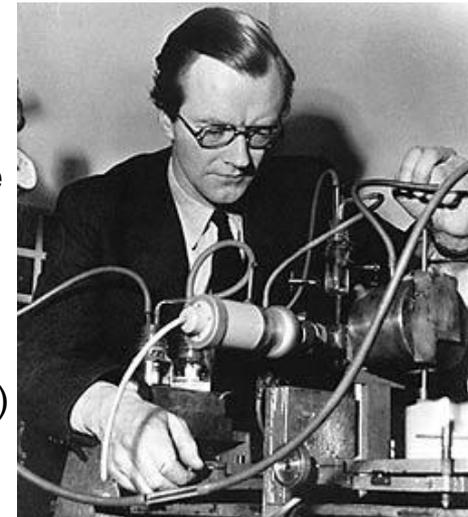


ESRF Grenoble

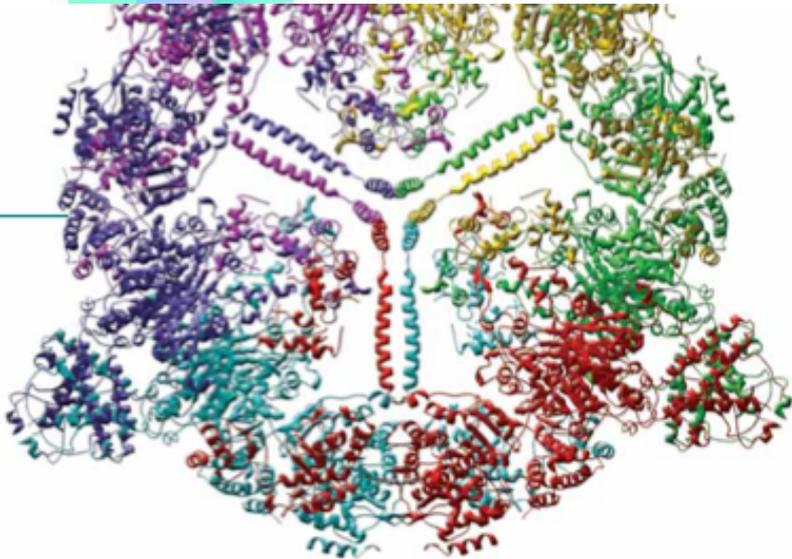


Rayos X extra brillantes

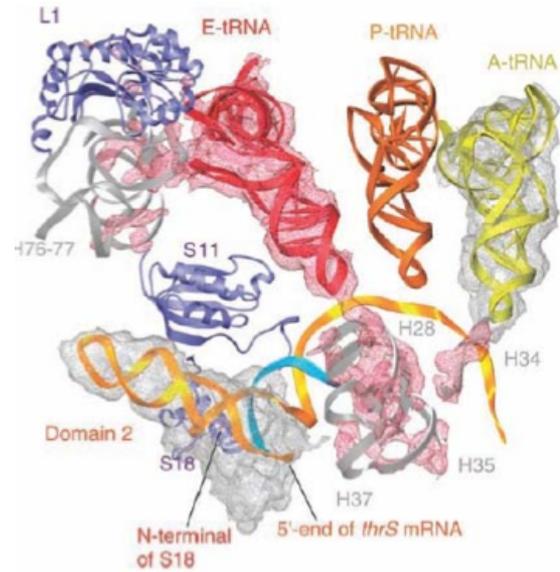
Maurice Wilkins con su equipo de difracción de rayos X. Premio Nobel de Medicina 1962 ... con Watson y Crick! En el Cavendish de Cambridge.  
(Rosalind Franklin murió en 1958)



# Biomoléculas y más



Glicoproteína GP120 en la superficie del HIV Nat. Synchrotron Light Source Brookhaven



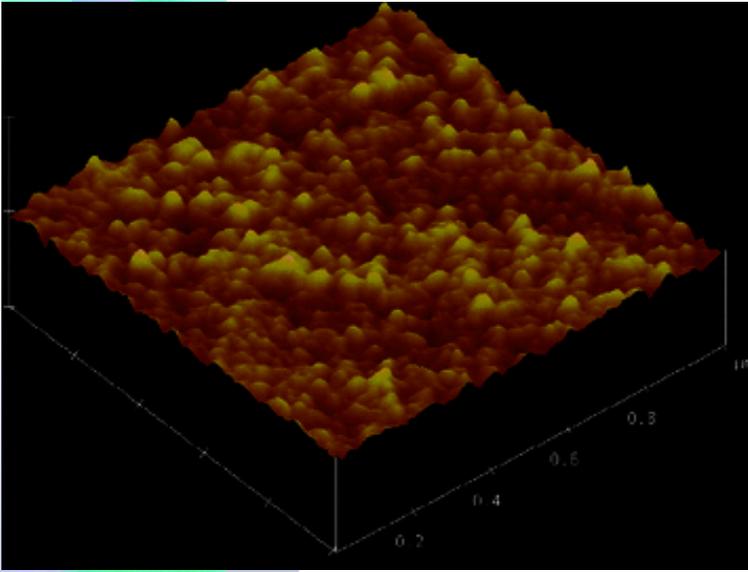
Mecanismo de los ribosomas (proteínas y RNA) al sintetizar proteínas a partir de información del DNA transmitida por mRNA Paul Scherrer Institute SLS



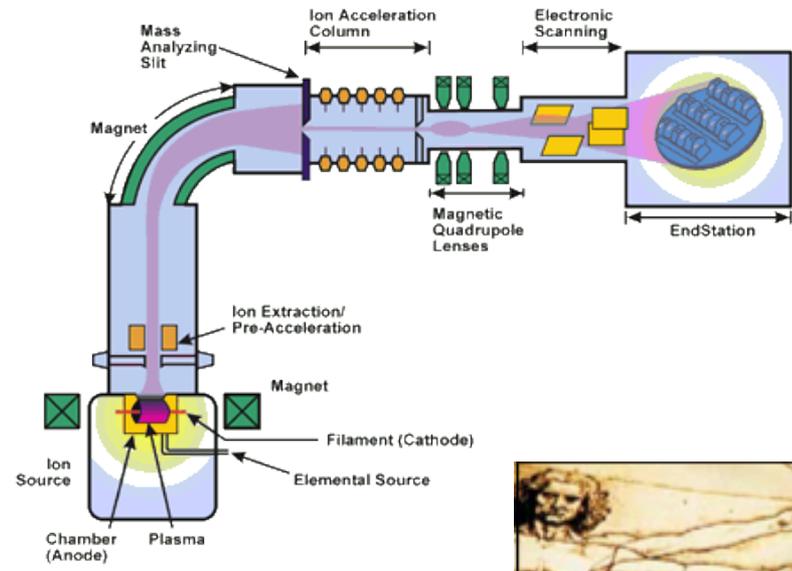
Tecnología de pañales!  
Cadenas poliméricas superabsorbentes  
Dow Chemical Company:  
Advanced Light Source LBNL  
para observar los polímeros en estado húmedo y mejorar su composición. Todos los pañales modernos usan este tipo de polímero mejorado con luz sincrotrón.



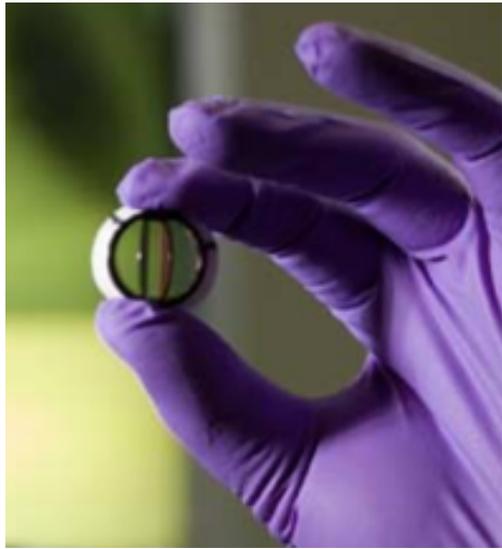
# Tratamiento superficial e implantación iónica



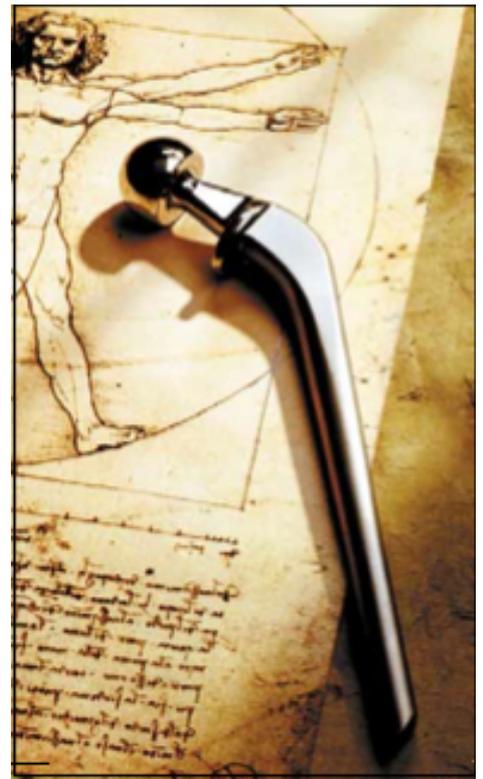
Placa de ZnSe con iones N implantados (semiconductor para LEDs). B, P en Silicio



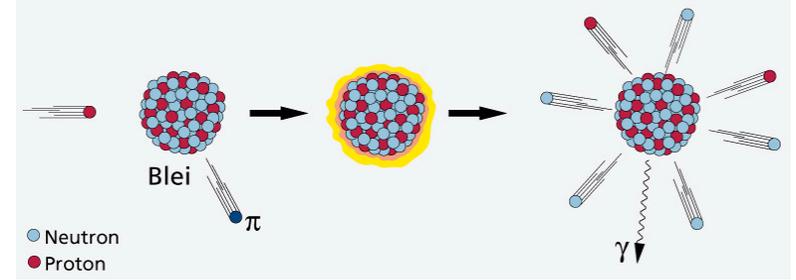
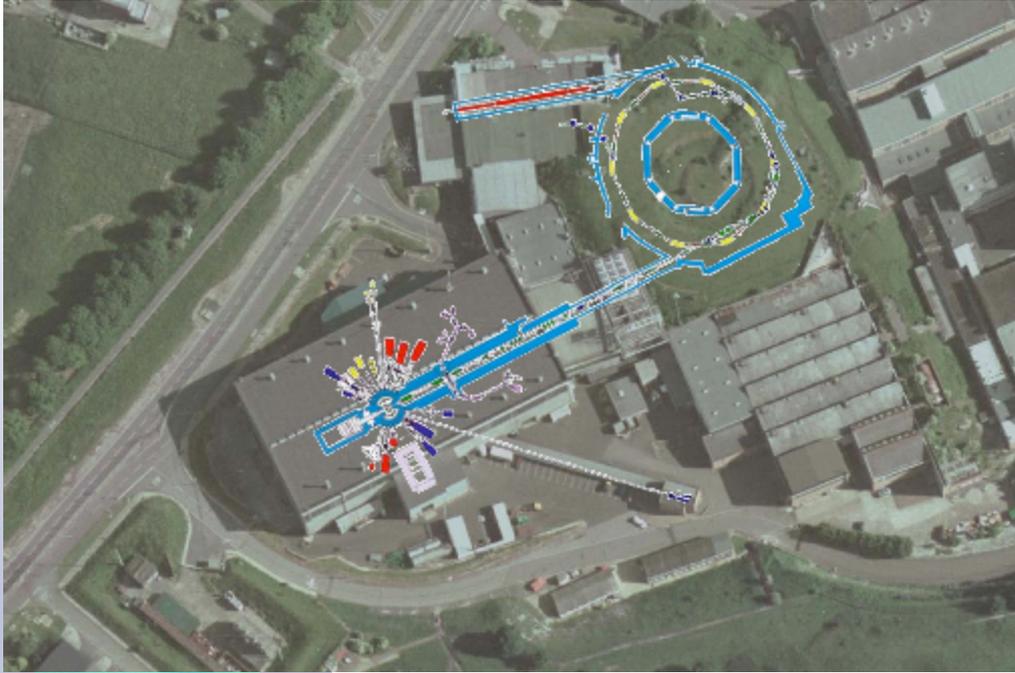
Acabado de muebles por haz de electrones, resistente al rayado y ensuciado



Válvula de corazón artificial con iones Ag antimicrobianos

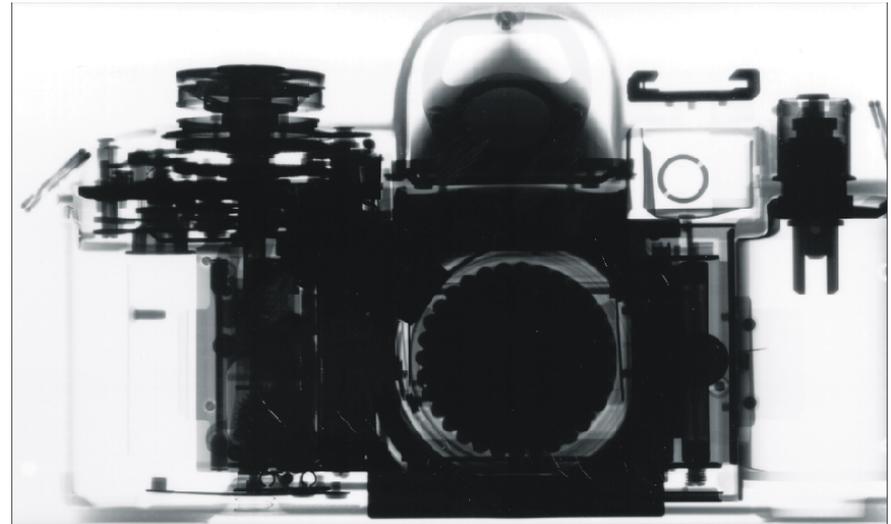
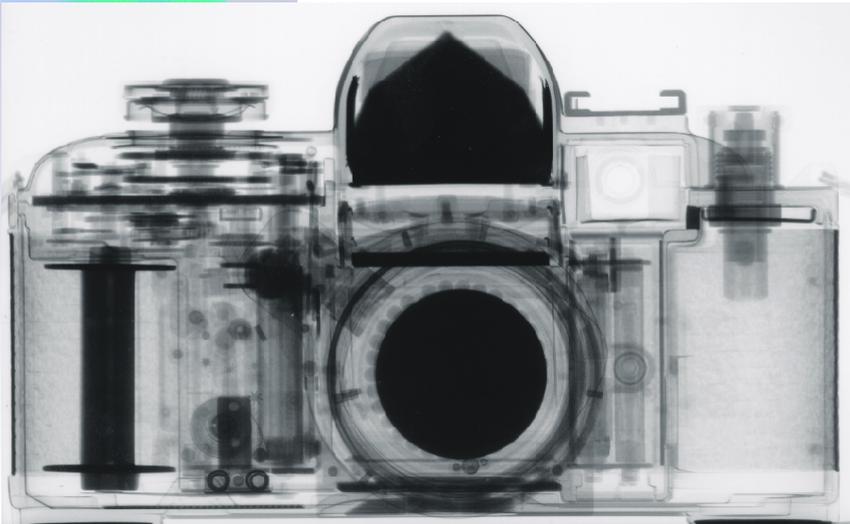


# Fuentes de neutrones



Neutrones: Interaccionan con las fuerzas nucleares (llegan a “ver” el núcleo).  
Neutrografías visualizar elementos ligeros absorbentes de neutrones (hidrógeno del agua, músculos, plásticos). Aplicaciones en ciencia de materiales y Física de la materia condensada

Fuente de neutrones ISIS en el Rutherford-Appleton Lab (UK)



# Historia, Arte, Arqueología

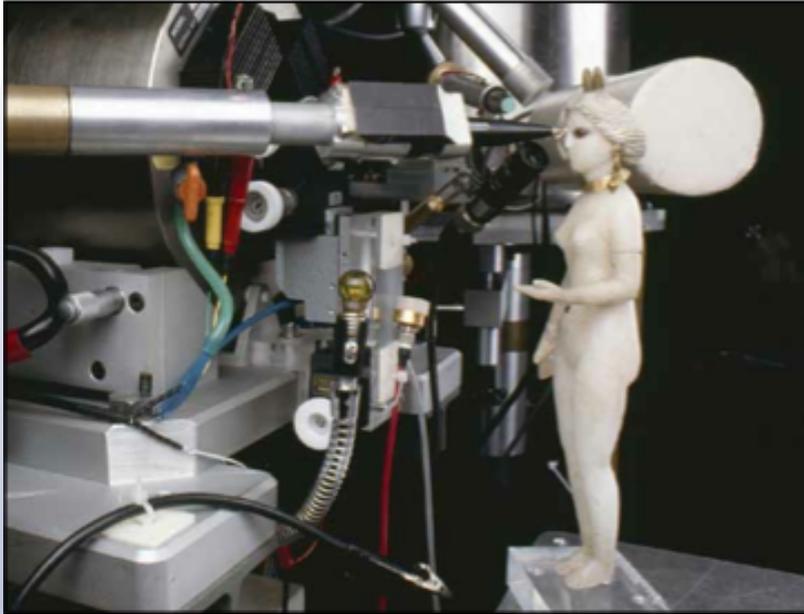
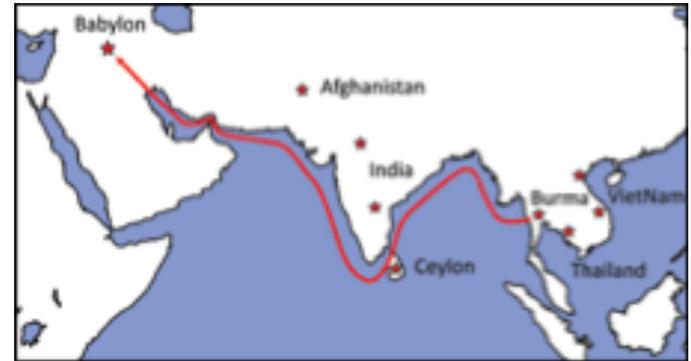


Figura de alabastro de la diosa Ishtar hallada en una tumba de más de 2000 años en Mesopotamia. Los ojos rojos de la figura son rubíes que analizados por el AGLAE revelaron trazas de elementos que sitúan los rubíes en Birmania. Ello revela el hecho histórico desconocido de la existencia de una ruta comercial entre el sureste asiático y Babilonia.

AGLAE, Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire:  
Haces de electrones para analizar arte antiguo



Análisis por neutrones del casco griego del siglo VII aC, propiedad del Museo de Manchester, en el instrumento ROTAX de la fuente de neutrones ISIS.

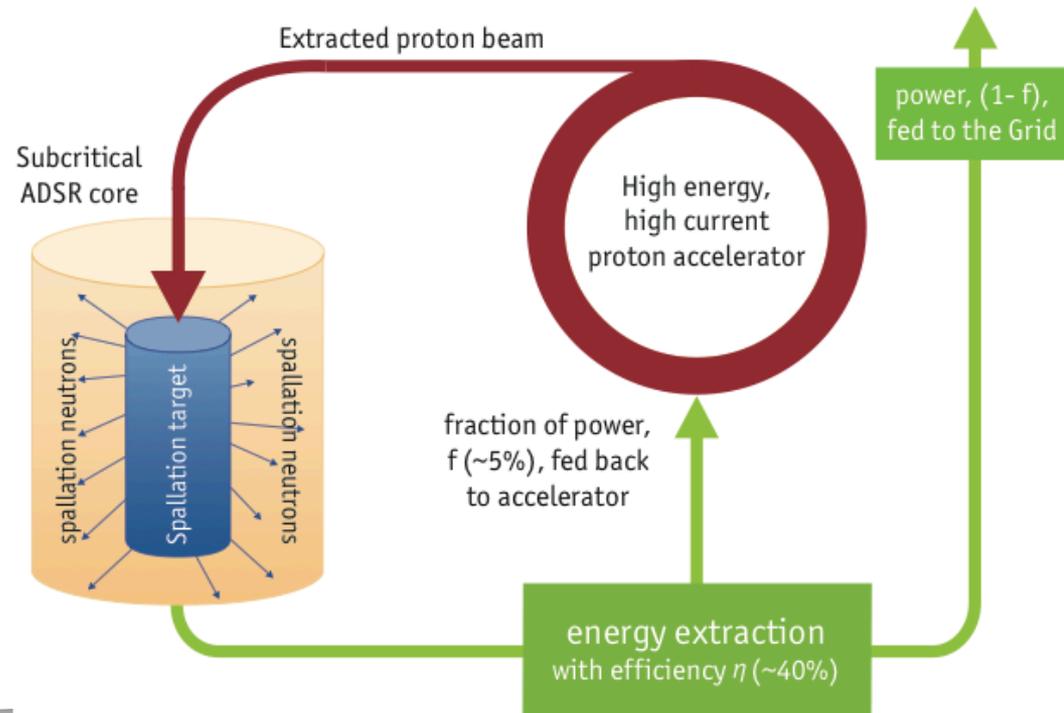
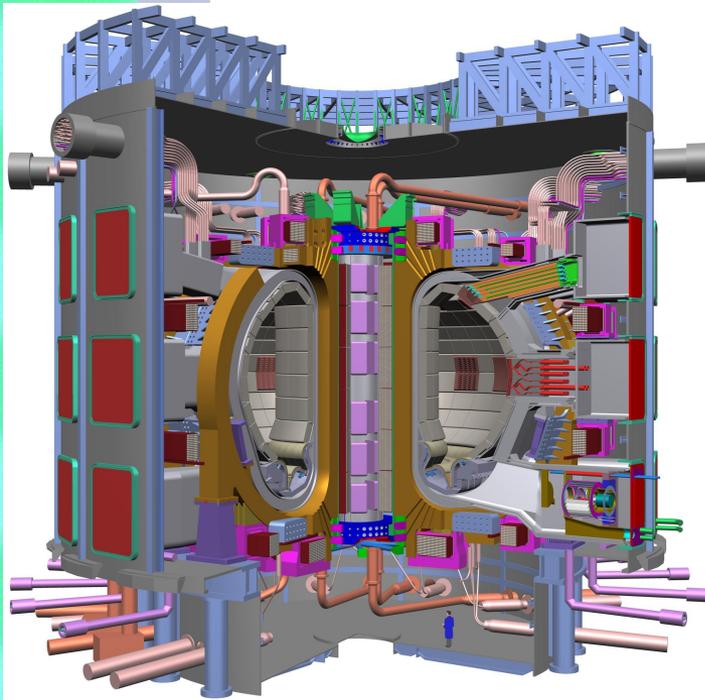
# Energía para el futuro

ADSRs: Accelerator Driven Subcritical Reactors: Idea propuesta por Carlo Rubbia, Premio Nobel en 1984 y ex director del CERN

Uso de Torio (Th), abundante no fisionable, pero fértil.

Reactor subcrítico: si se apaga el acelerador, deja de funcionar

Limitación: Tecnología de acelerador



Estudio de nuevos materiales para Fusión:  
Materiales para contener un sol artificial!

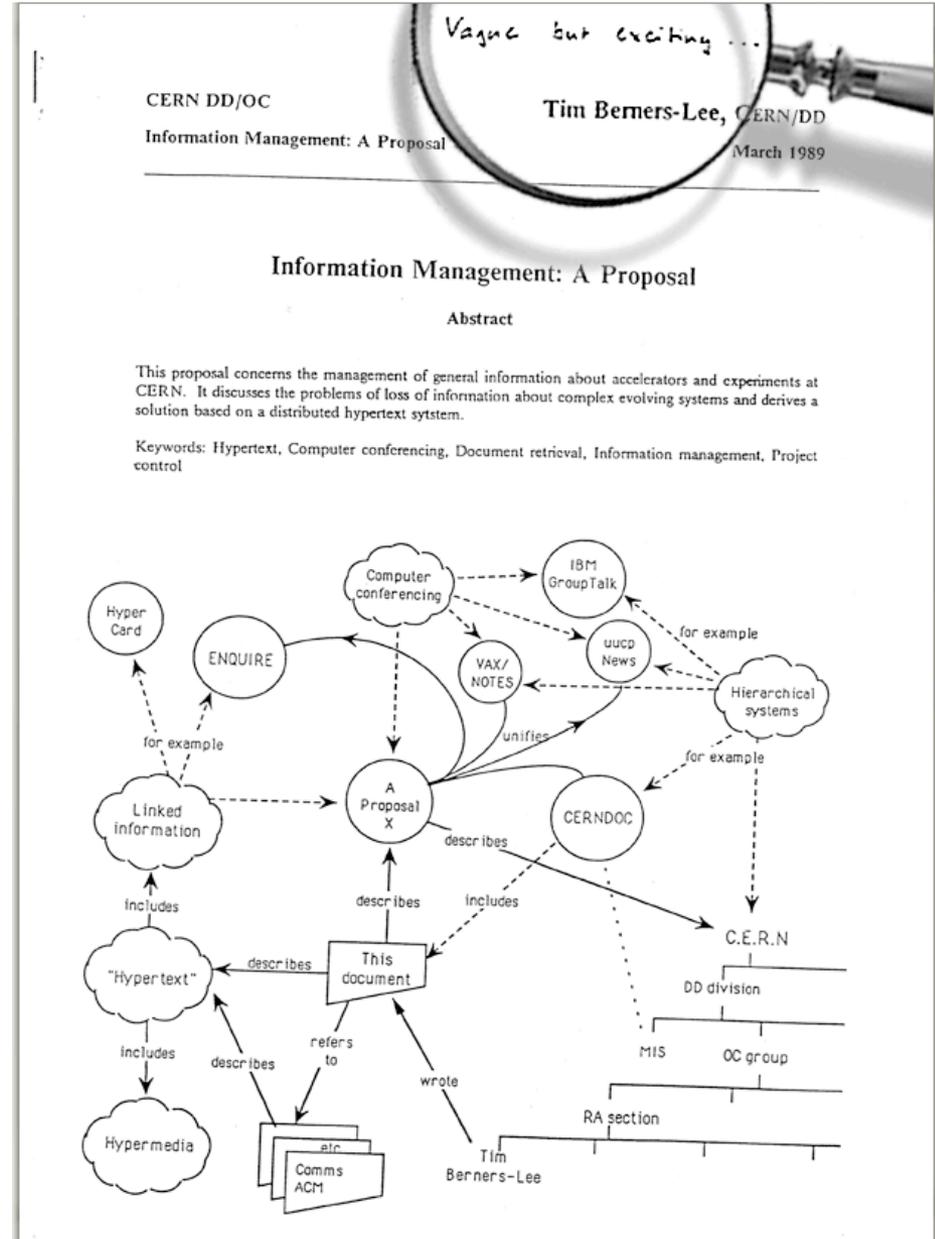
# La World Wide Web



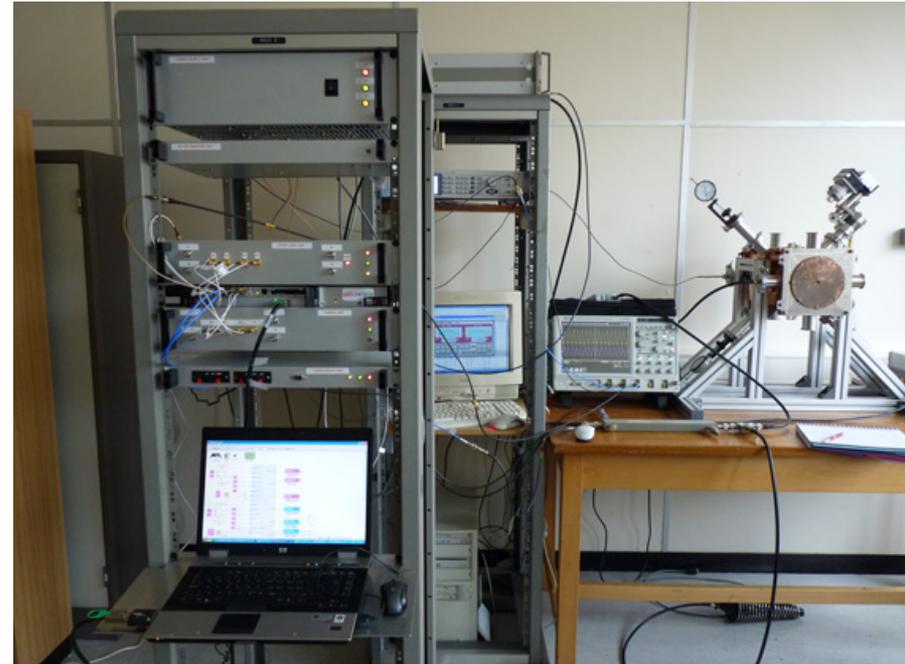
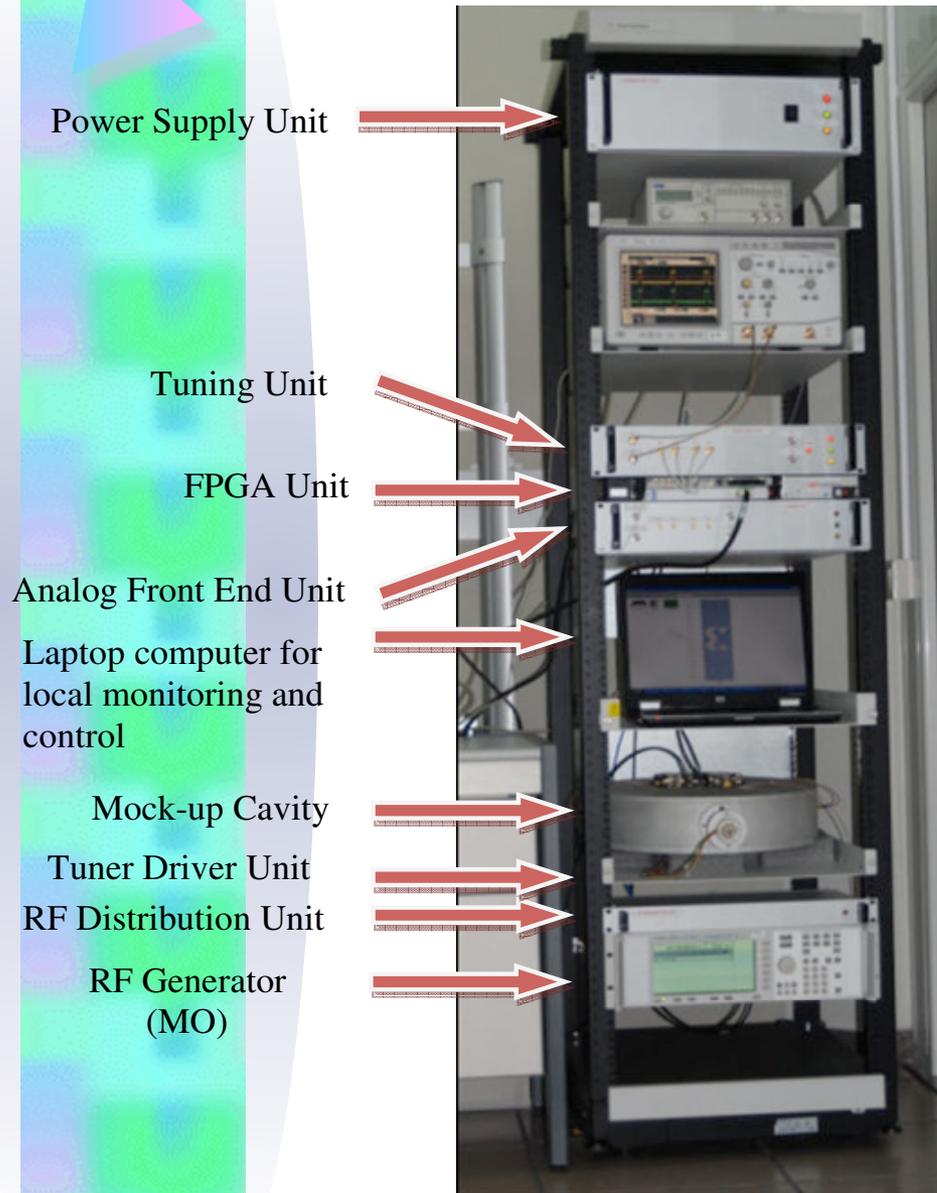
Tim Berners-Lee,  
Físico del CERN



Robert Cailliau,  
Ingeniero de sistemas



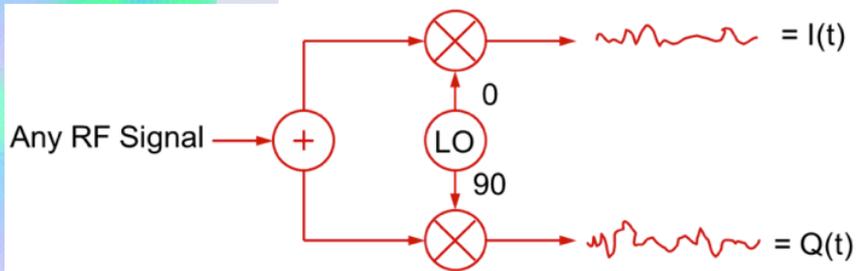
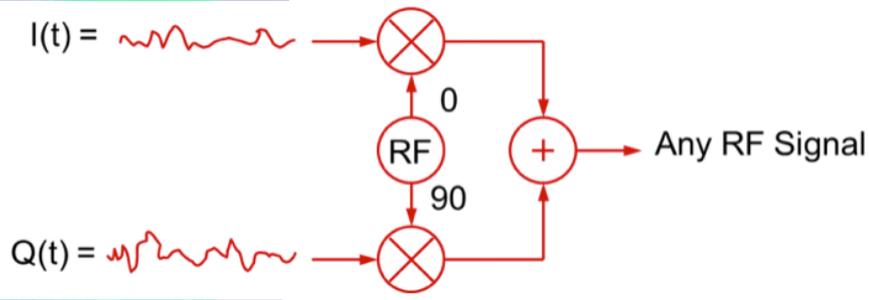
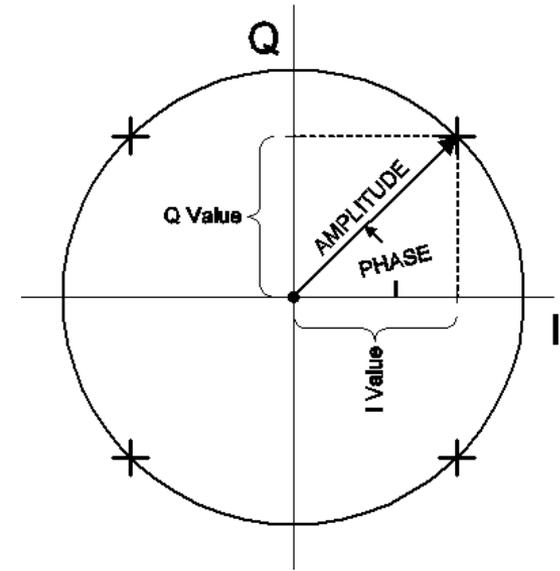
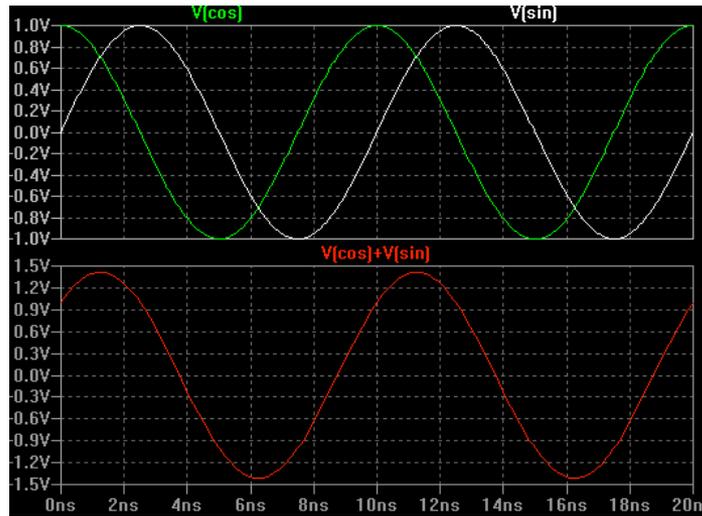
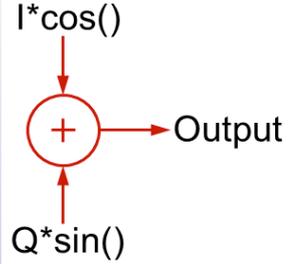
# Low-Level RF Control (LLRF)



LLRF: Control de campos eléctricos acelerantes al paso de las partículas

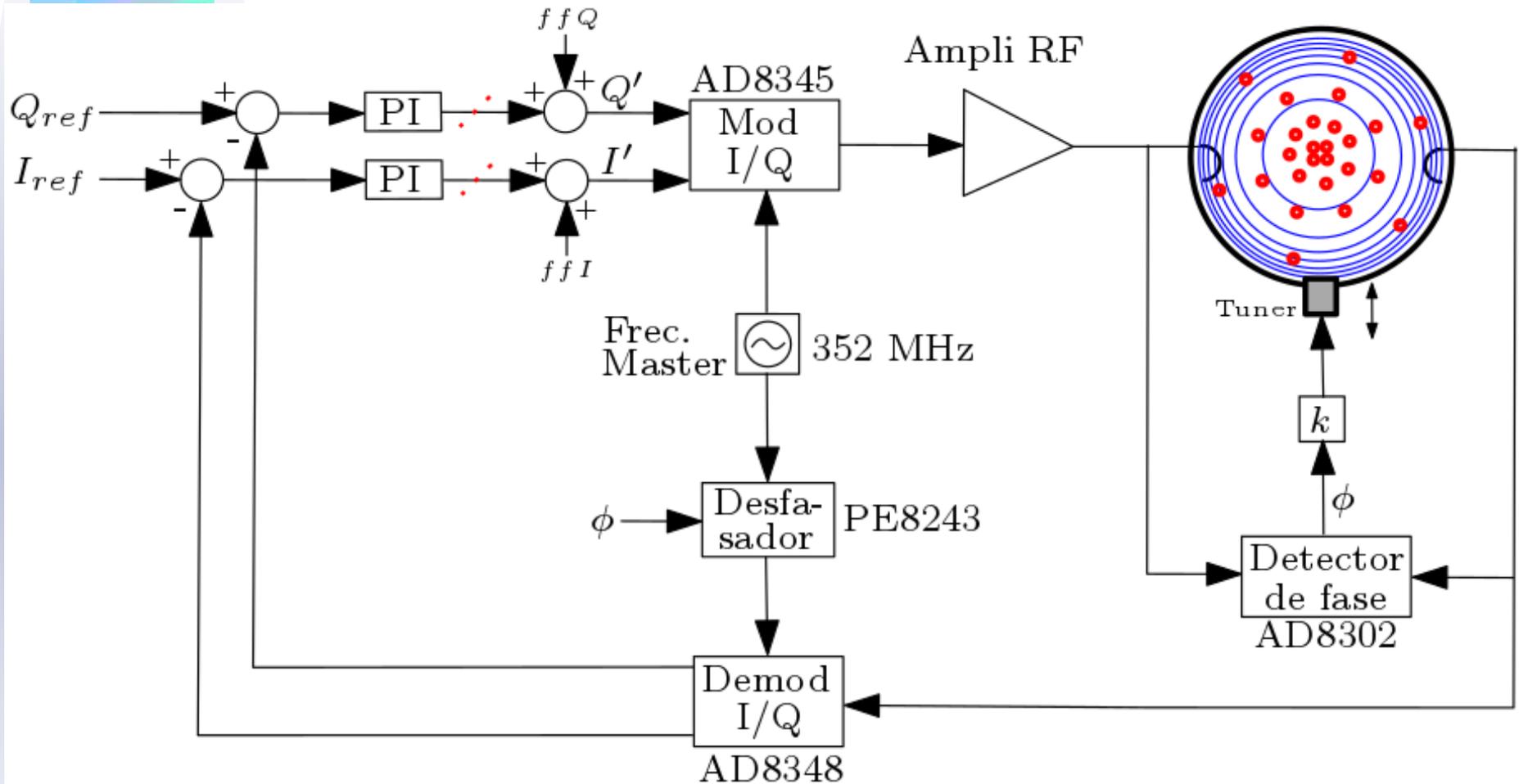
Desarrollado en UPV/EHU, usado en Imperial College London, y en Fuente de neutrones ISIS (Oxfordshire) colaboración FETS  
Tesis Doctoral concluida con éxito

# Low-Level RF Control (LLRF)



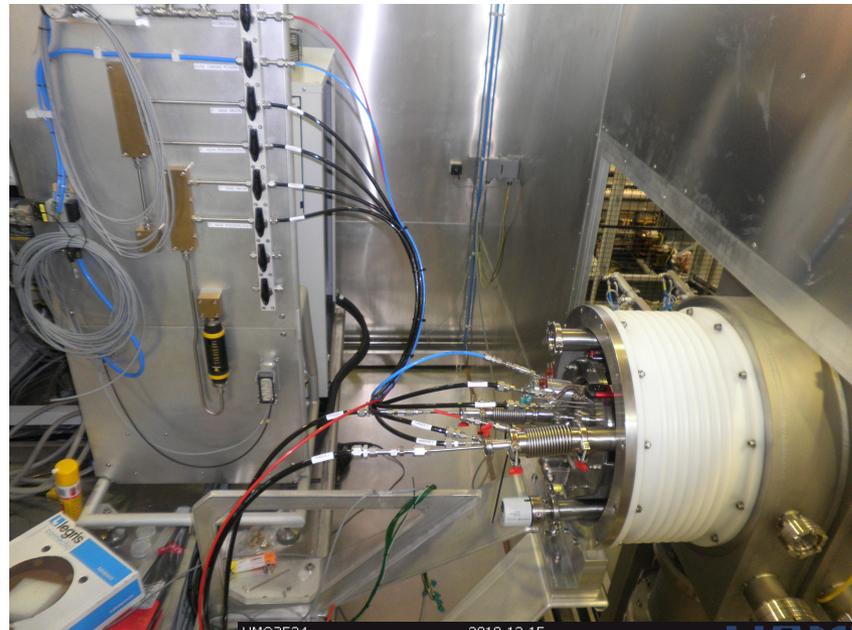
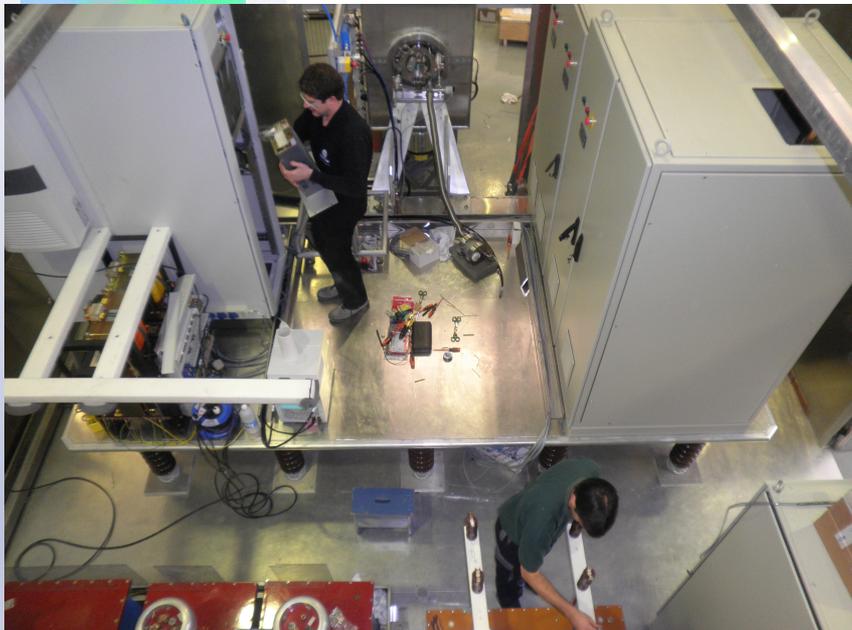
Modulación y Demodulación IQ  
 Puede controlarse la amplitud y fase  
 de cualquier señal de RF  
 Existen componentes electrónicos  
 de telecomunicaciones:  
 moduladores, demoduladores,  
 detectores de fase, de amplitud...

# Low-Level RF Control (LLRF)

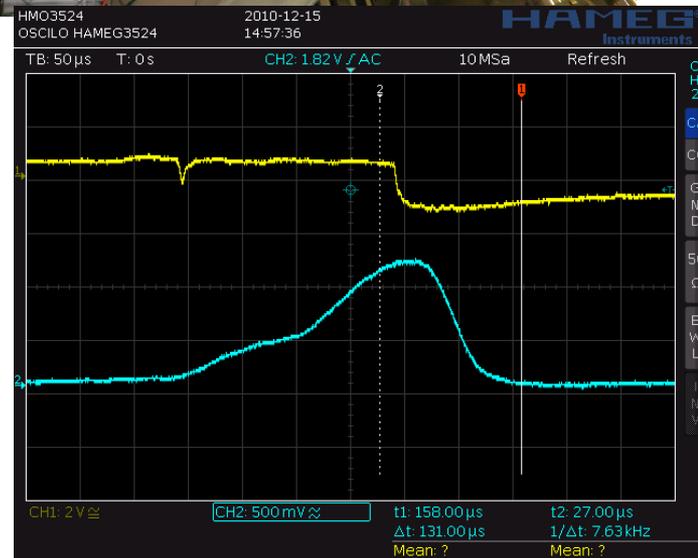


Control analógico LLRF: Lazos amplitud y fase (rápidos), y frecuencia (lento)

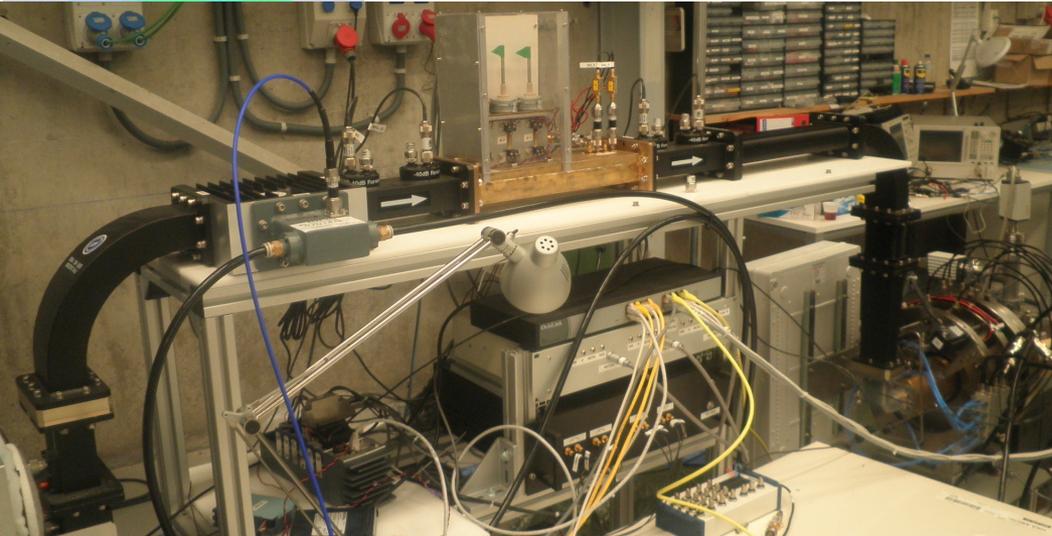
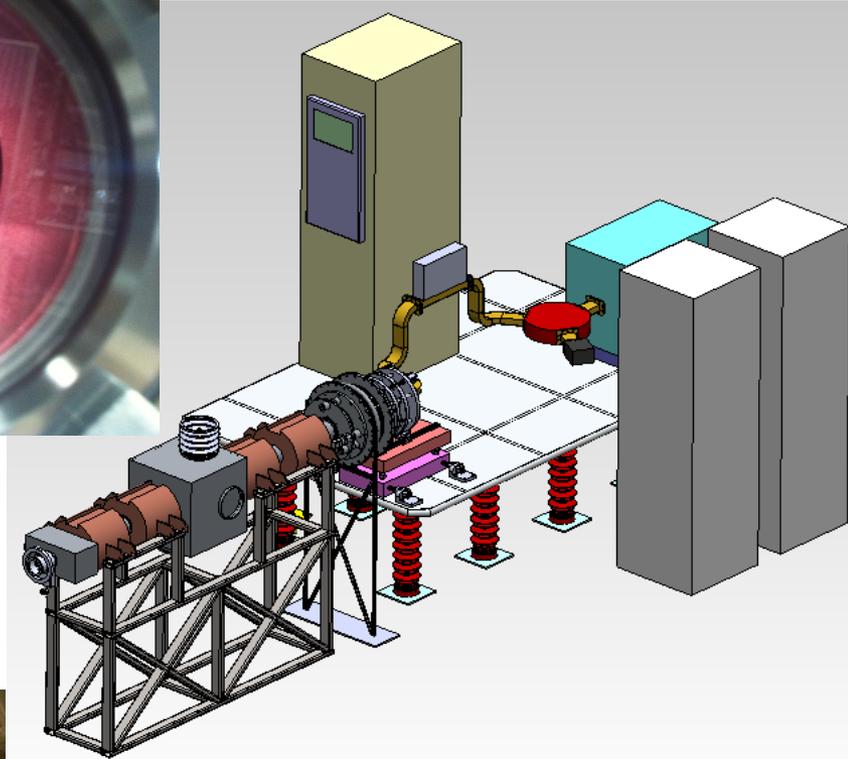
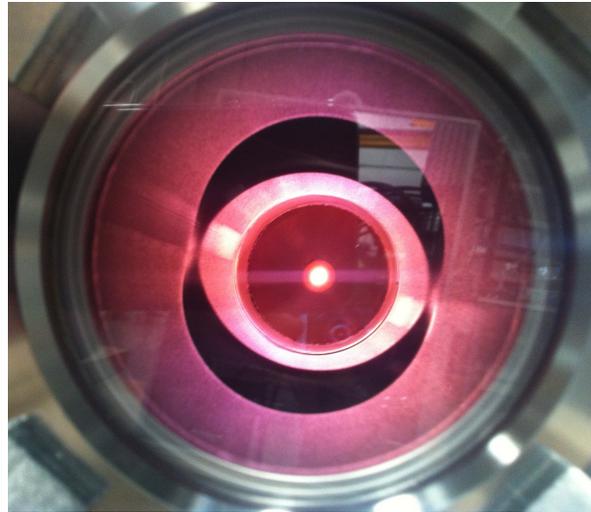
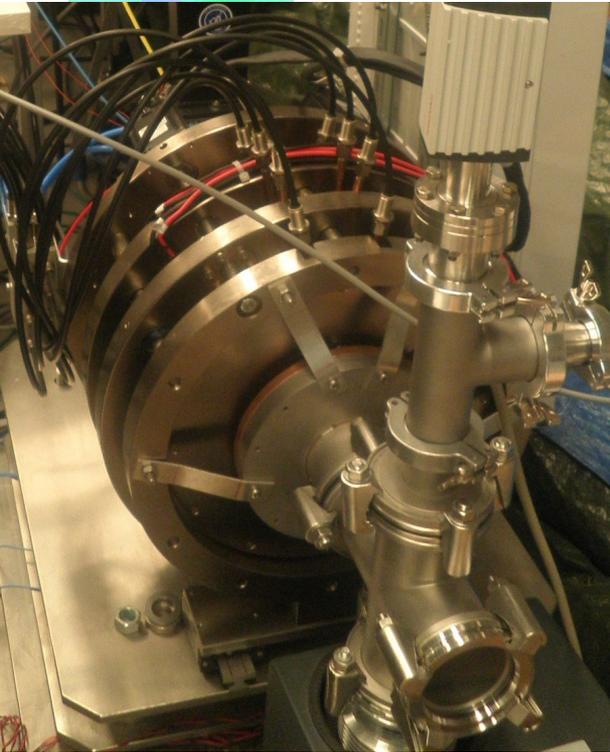
# Monitorización y control en red (EPICS): Experimental Physics and Industrial Control System



Fuente de iones  $H^-$   
Sincronía y control  
en red (EPICS)  
-Plasma por descarga  
de arco  
-Haz  $H^-$  extraído  
-Tesis Doctoral  
concluida con éxito

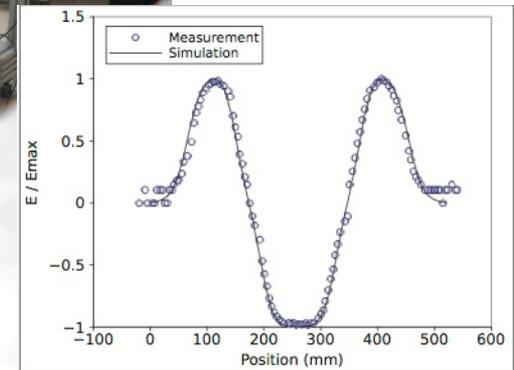
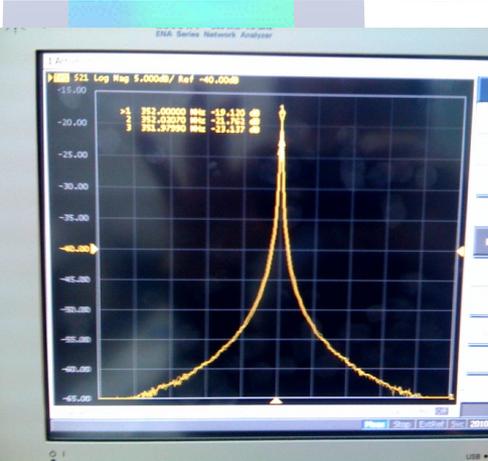


# Fuente de protones: Automatic Tuning Unit (ATU)



- Fuente de iones  $H^+$  (protones):
- Sistema sintonizador automático para maximizar potencia RF transmitida y generación eficiente de plasma de Hidrógeno (ATU)
  - Sistema electrónico para control y adquisición en lazo cerrado
  - Tesis Doctoral concluida con éxito

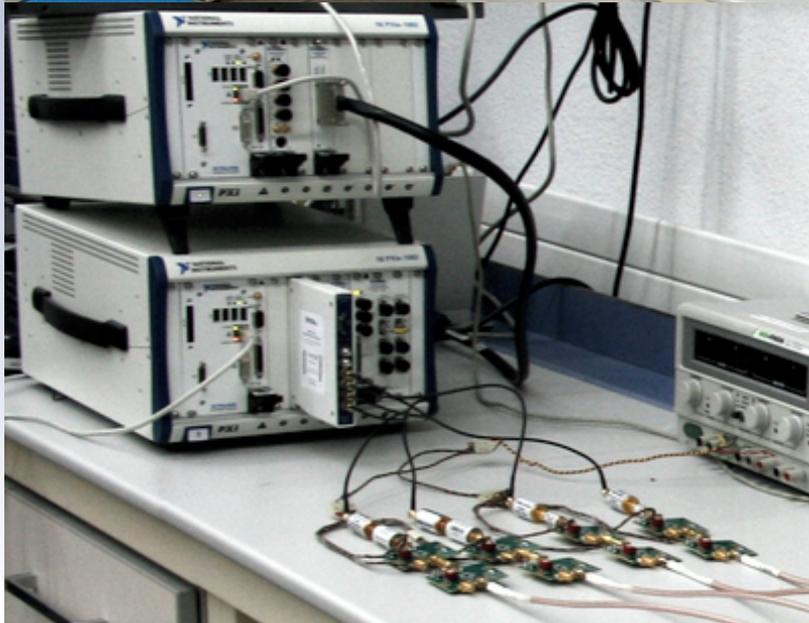
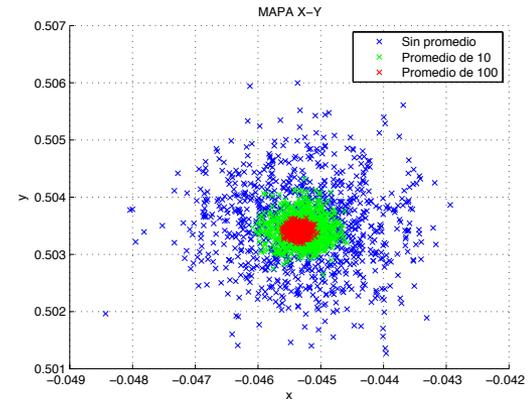
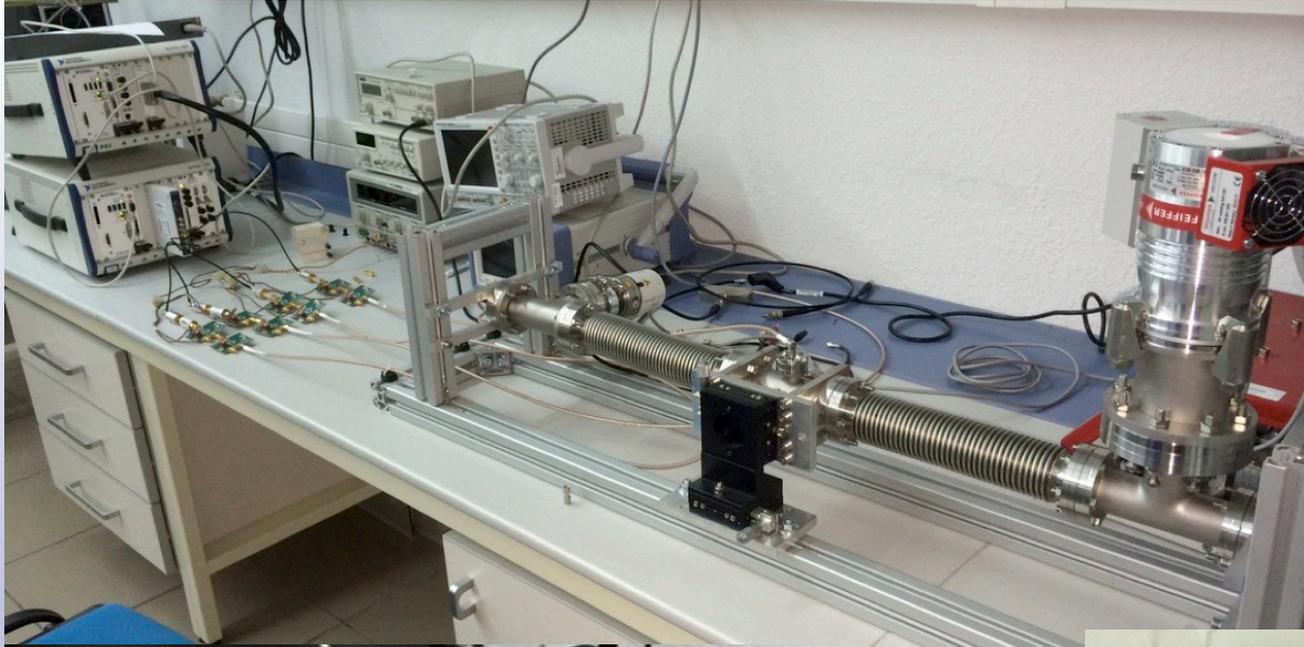
# Estructuras resonantes para aceleración



Sistema de medida de campos electromagnéticos acelerantes en estructuras resonantes de RF

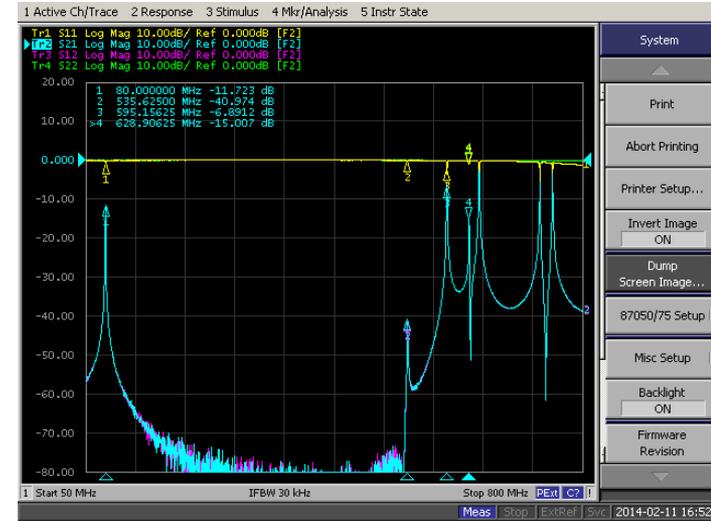
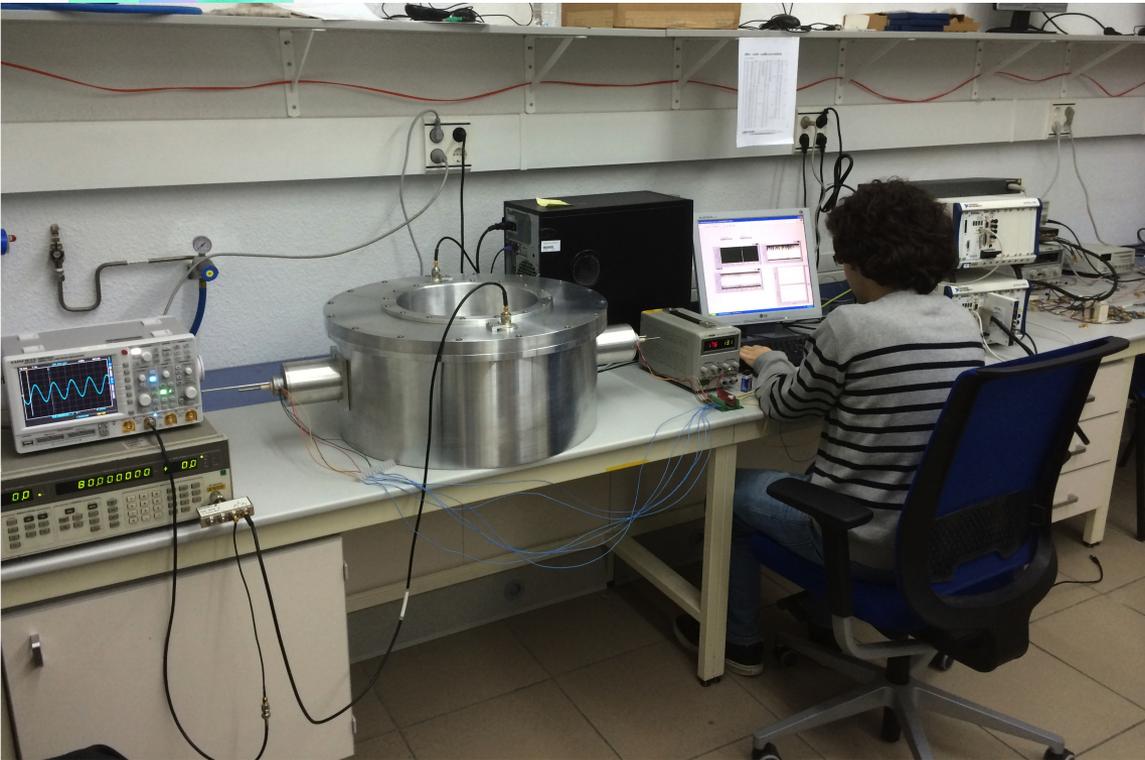
- Cavidades superconductoras de geometría tipo spoke (Col. IPN Orsay)
- Cuadrupolo de radiofrecuencia (RFQ)

# Beam position monitors (BPMs)

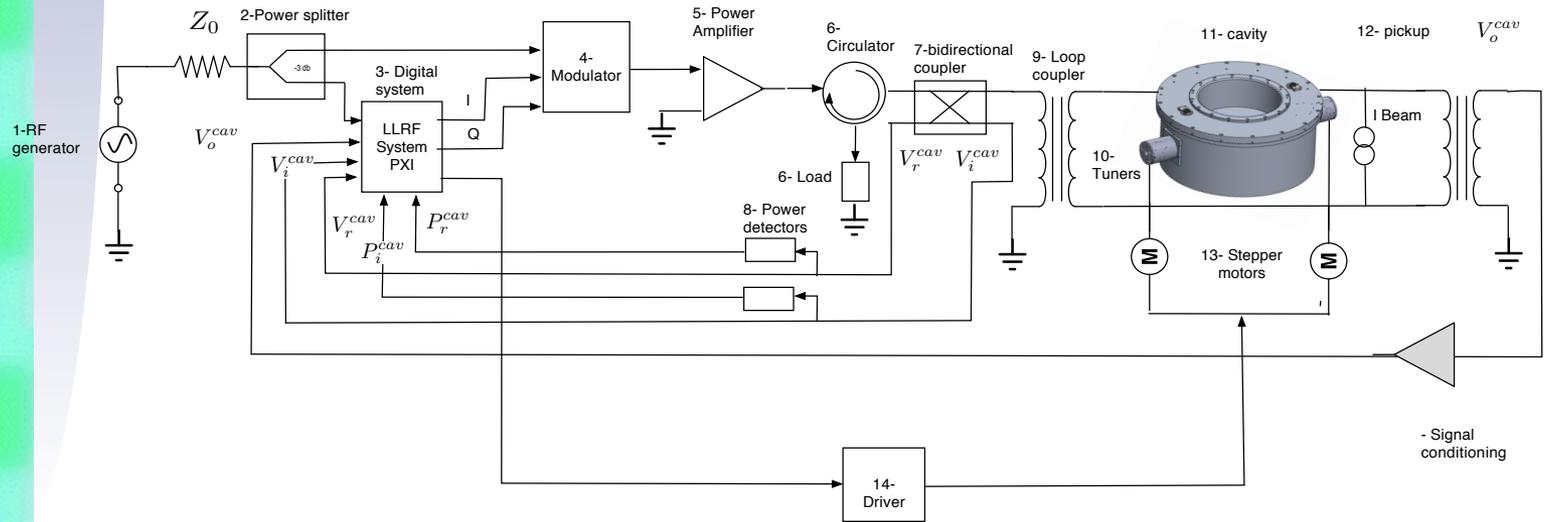


Tesis Doctoral completada con exito

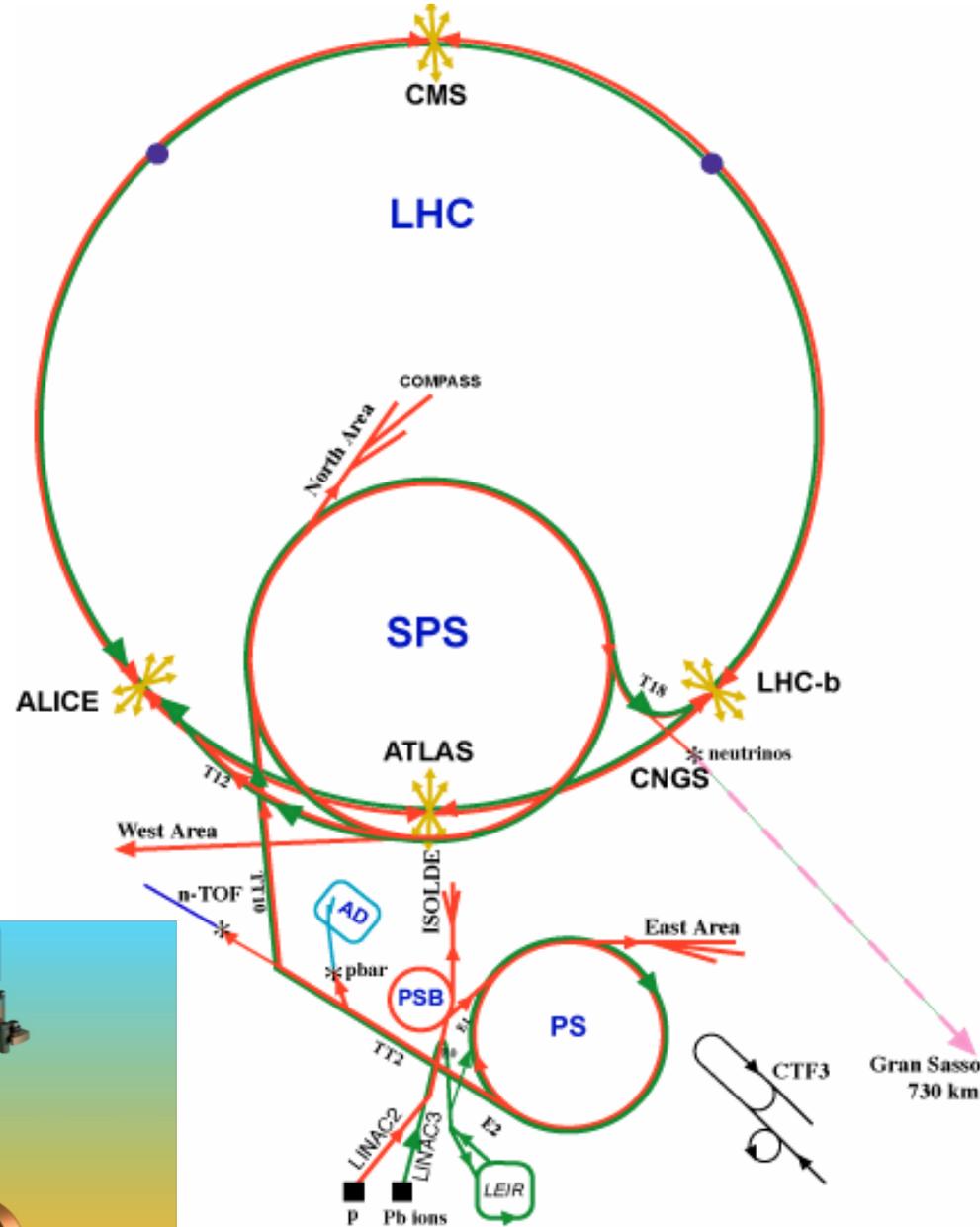
# LLRF (nueva generación)



Tesis Doctoral en curso



# Ejemplo de tracción a la industria



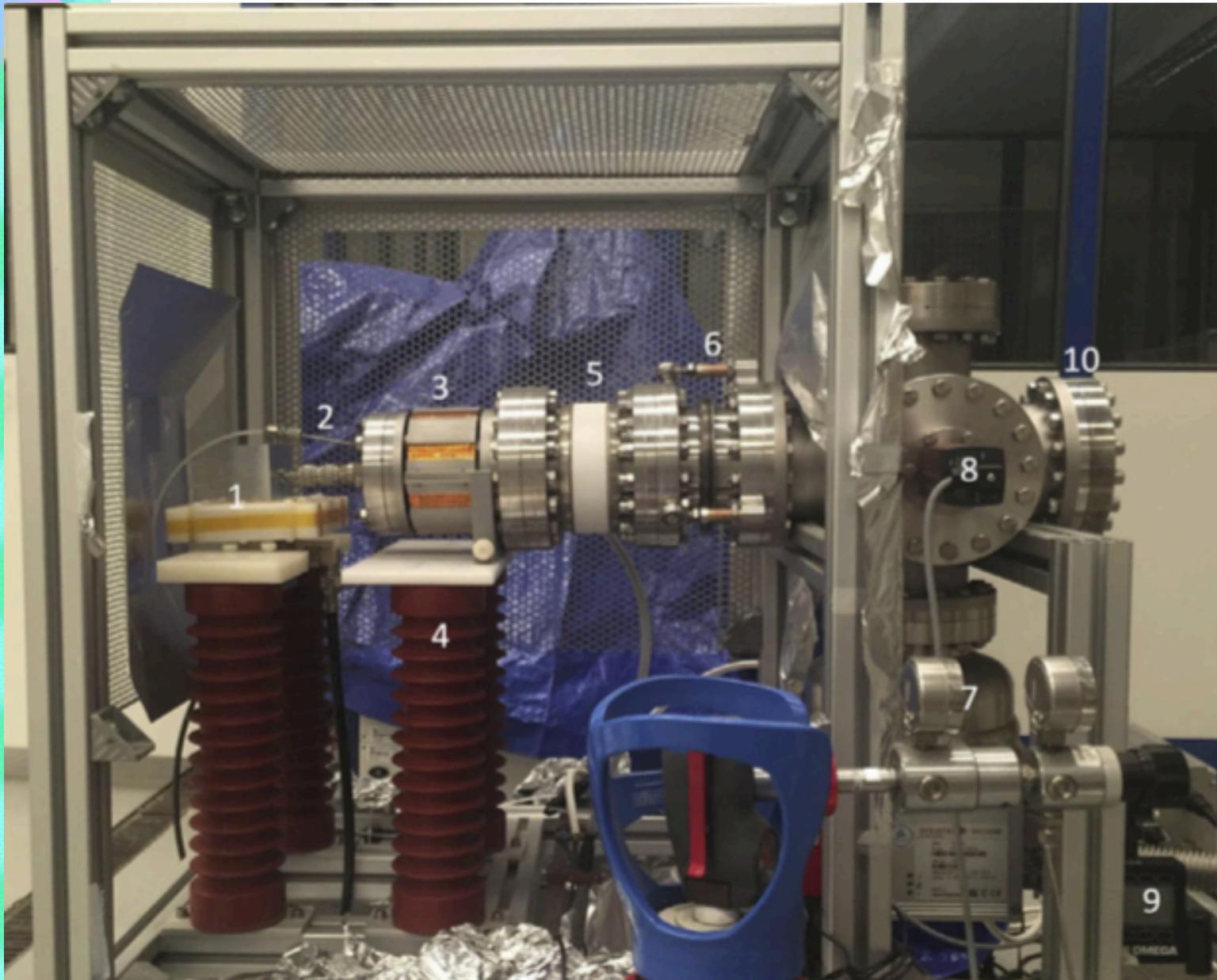
Cadinox (Belauntza)  
Aibe (Eibar)  
Mancisidor (Elgoibar)  
DMP (Mendaro)

# En curso: Fuente de Iones Multiespecie Compacta

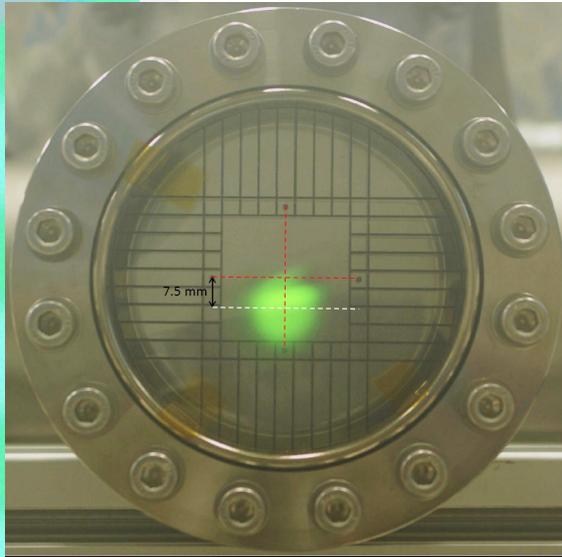


Diseñada e implementada en casa en su totalidad UPV/EHU

# Fuente Compacta: Principios de Funcionamiento

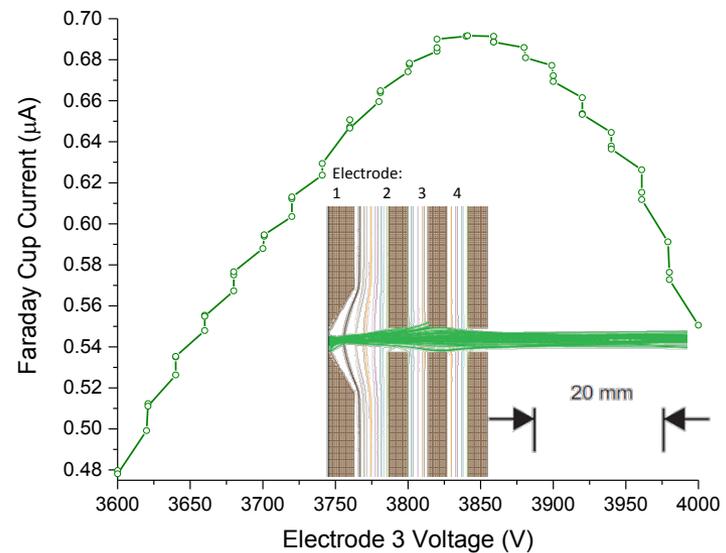
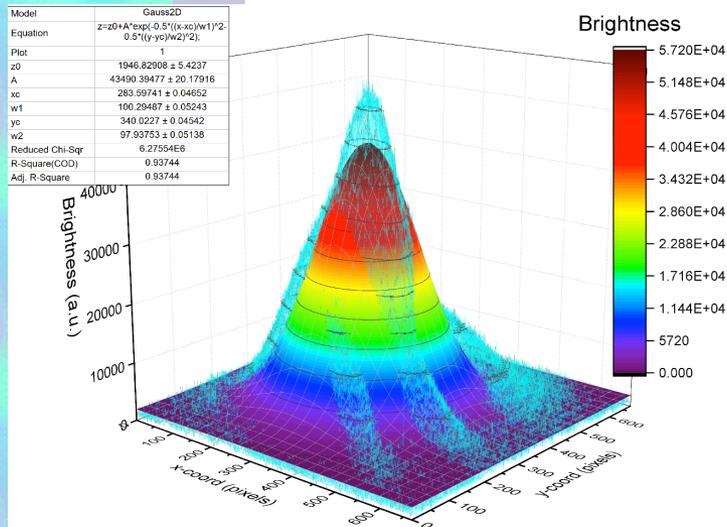


# Fuente Multiespecie Compacta: Resultados $H^+$



## Parametros PIT30

|                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Frecuencia microondas | 3 GHz                 |
| Potencia microondas   | <100 W                |
| Flujo masico de gas   | <5 sccm ( $H_2$ )     |
| Campo magnetico       | 110 mT                |
| Voltaje de extraccion | <30 kV                |
| Corriente de haz      | <50 $\mu A$ ( $H^+$ ) |
| Emitancia de haz      | <0.2 $\pi$ mm mrad    |



# Aceleradores de partículas: Ciencia y Tecnología Global

Físicos, Químicos, Matemáticos, Biólogos, Geólogos, Ingenieros...

