

# Sobre la Naturaleza de las Interacciones

José A. Oller

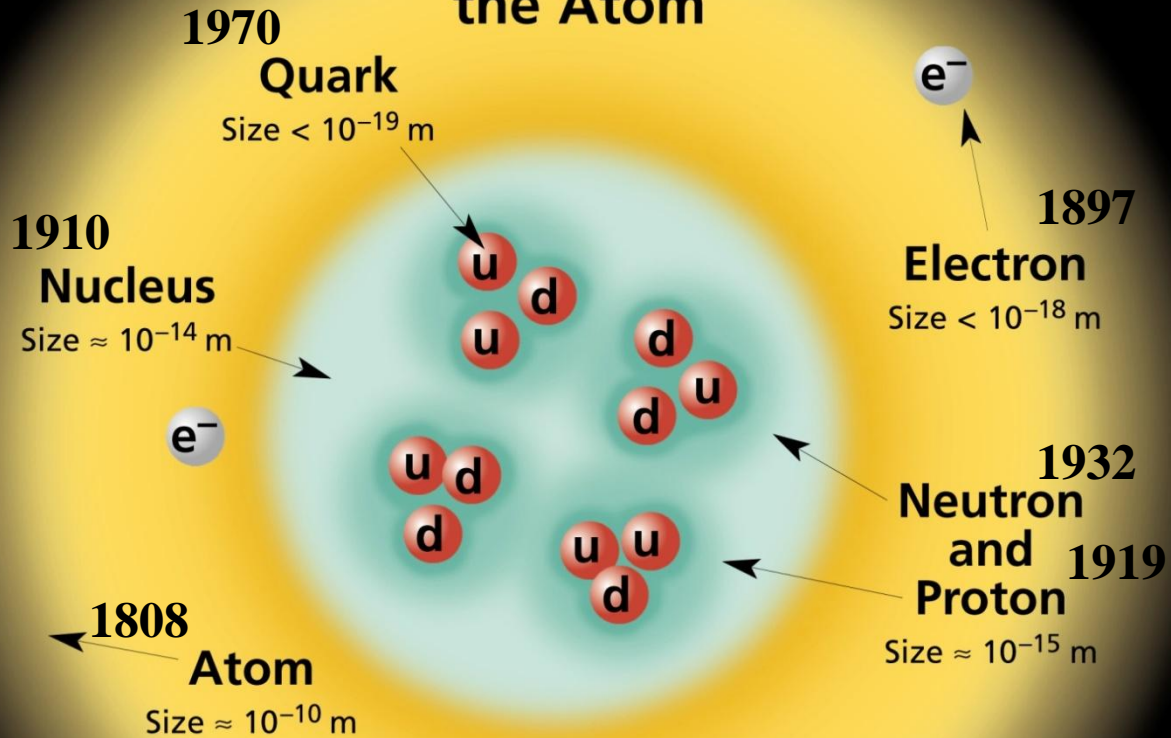
Departamento de Física. Universidad de Murcia

Soy Físico Nuclear y de Partículas.

Me dedico al estudio de los constituyentes fundamentales de la materia. Más concretamente de los núcleos atómicos y de las partículas subatómicas.

Aquí hay una representación, que aunque no está a escala, sí que recoge los constituyentes básicos de la materia ordinaria.

## Structure within the Atom



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

El átomo consta de una nube de electrones que giran alrededor de un Núcleo Atómico.

La distancia entre un electrón y el núcleo es unas  $100000=10^5$  veces el tamaño del núcleo.

La distancia Tierra-Sol es sólo unas 210 veces el radio del Sol. El átomo está realmente “vacío”. Un electrón “vería” unas 500 más pequeño el núcleo atómico que nosotros vemos el Sol. Por ello la química no necesitó de ocuparse de los núcleos atómicos y sólo de los electrones.

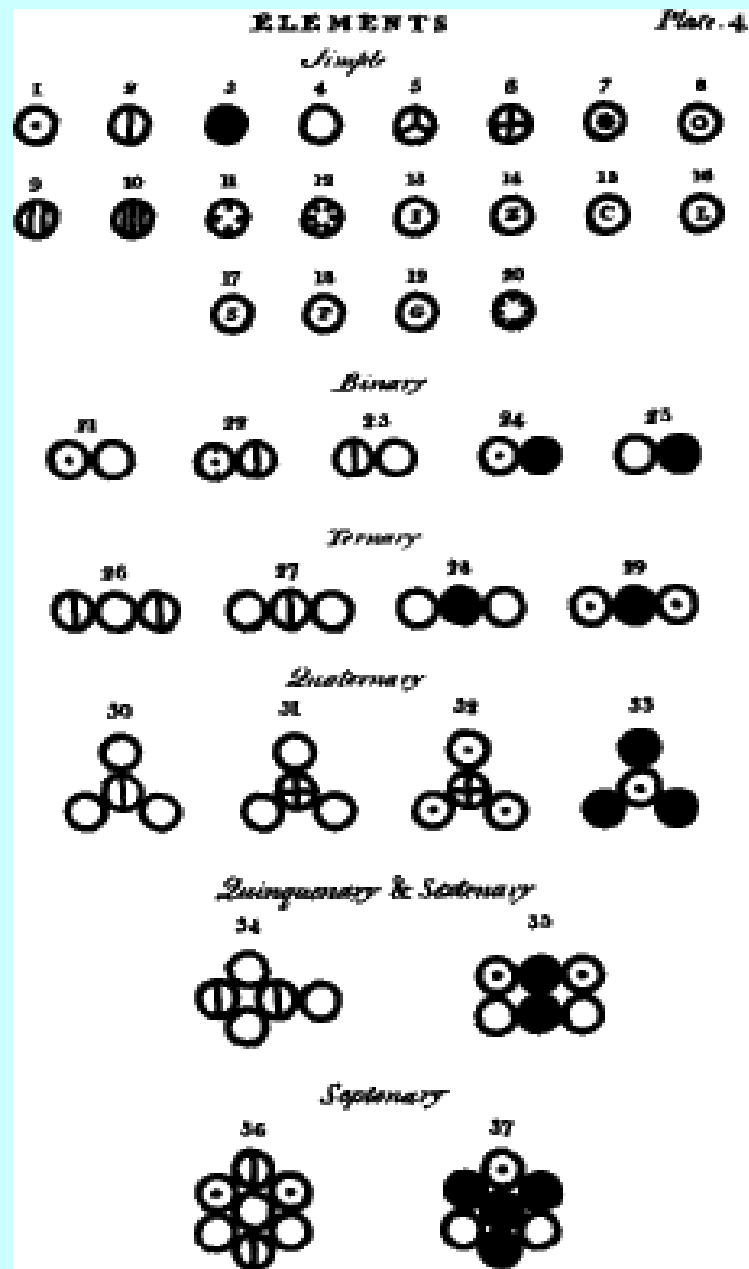
La masa de un electrón es media millonésima de la masa del núcleo de Uranio. La Tierra es un millón de veces menos pesada que el Sol. Así que prácticamente toda la masa del átomo está concentrada en el núcleo atómico.

# La Tabla Periódica de los Elementos

- **J.Dalton:** Padre de la teoría atómica moderna.  
*“ascertaining the relative weights of the ultimate particles, both of simple and compound bodies, the number of simple elementary particles which constitute one compound particle, and the number of less compound particles which enter into the formation of one more compound particle.”*  
***A New System of Chemical Phylosophy, 1808.***

El agua tiene tres estados: gas, líquido, sólido. Ello se entiende fácilmente como un rearrreglo de un ingente número de partículas extremadamente pequeñas con fuerzas de cohesion que cambian según estado.

- **J. Dalton:**  
*A New System of Chemical  
 Phylosophy, 1808.*





## Dmitri Mendeleev.

Ordenación de los elementos químicos en columnas con propiedades químicas afines y con masa creciente.

Periodic Table of the Elements

1A																	0		
1	2																	10	
	IA	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0	
2	3	4											5	6	7	8	9	10	
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	11	12	13	14	15	16	17	18											18
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113						
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113						

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
* Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

La comprensión de esta disposición de los elementos químicos (así como sus propiedades) fue el gran logro de la Mecánica Cuántica. Llevó unos 50 años.



**Dmitri Mendeleev.**

Periodic Table of the Elements

1A																	0											
1	2											10	18	36	54	86	118											
H	He																											
2	3	4											10	18	36	54	86	118										
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne																					
3	11	12	13	14	15	16	17	18																				
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																					
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr											
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54										
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe											
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86										
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn											
		Series																										
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71													
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu													
		+ Actinide Series																										
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103													
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr													

**Demasiadas partículas elementales!**

Ordenación de los elementos químicos en columnas con propiedades químicas afines y

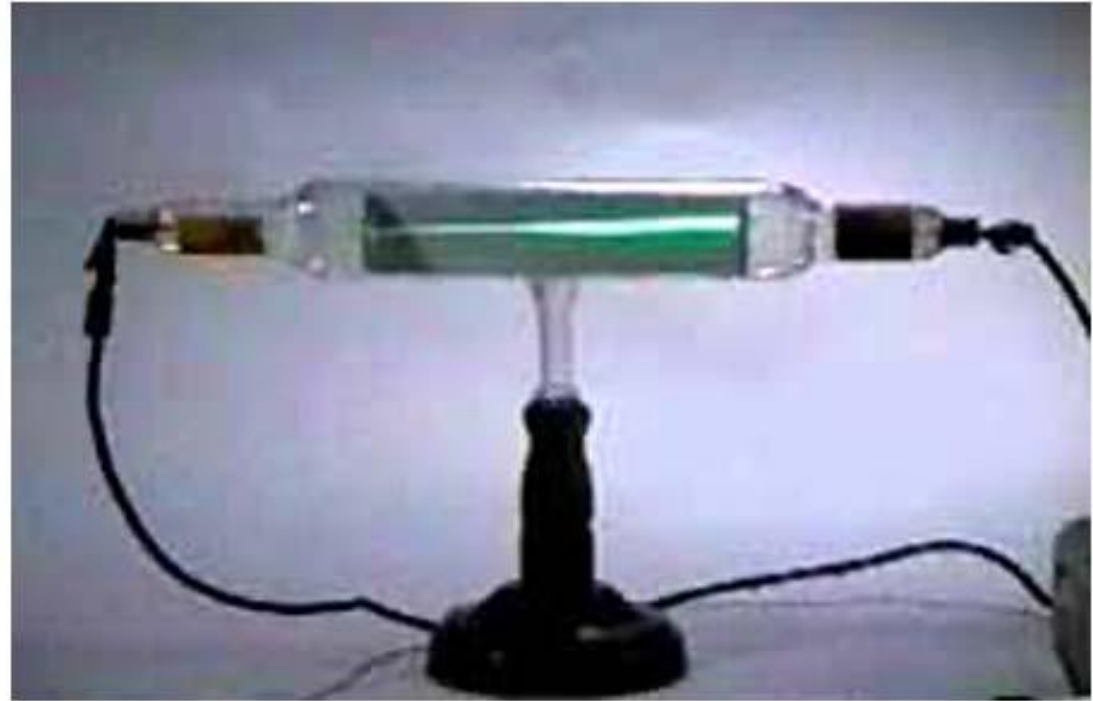
**¿CUÁLES SON LOS COMPONENTES DEL ÁTOMO ?**

# Descubrimiento del Electrón



J.J. Thomson ~1897

- Estudió los rayos catódicos
- Mediante campos eléctricos y magnéticos comprobó que se trataba de partículas de carga negativa.
- Determinó su velocidad y el cociente  $e/m$



Tubo de Rayos Catódicos

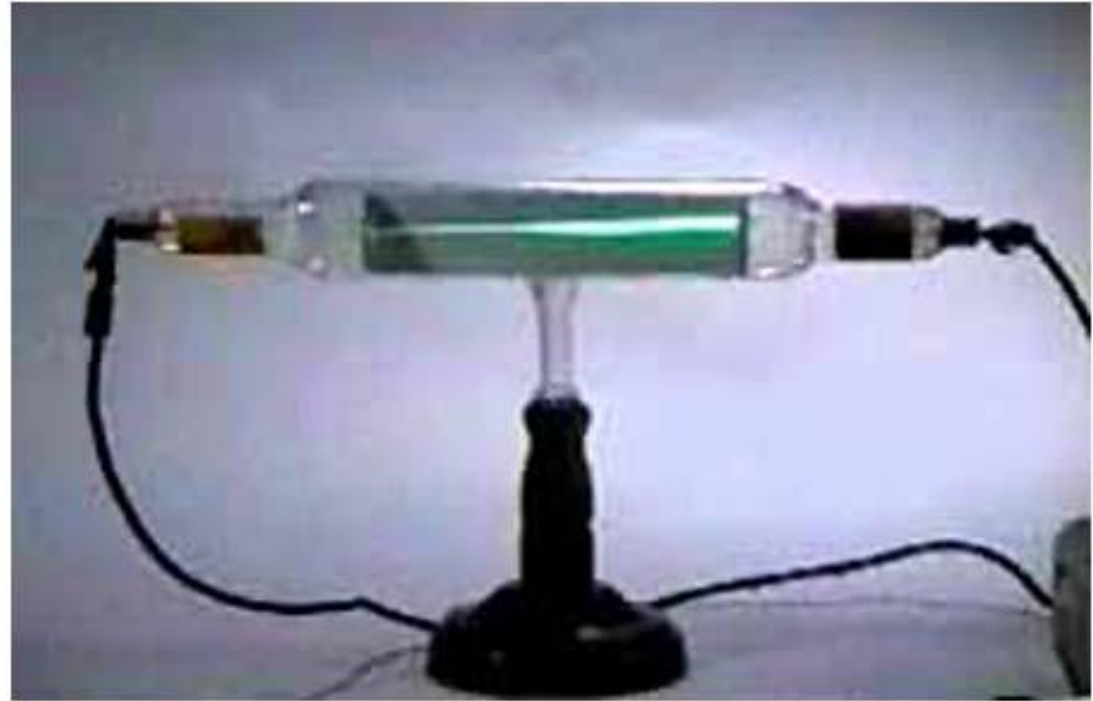


# Descubrimiento del Electrón



J.J. Thomson ~1897

- Estudió los rayos catódicos
- Mediante campos eléctricos y magnéticos comprobó que se trataba de partículas de carga negativa.
- Determinó su velocidad y el cociente  $e/m$



Tubo de Rayos Catódicos

- Estas partículas aparecían con las mismas propiedades independientemente del metal que los generase.

En 1899 Thomson determinó separadamente la carga y masa del electrón  $m=0.5 \text{ MeV}/c^2=9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ ,  $Q=1 e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Dado que la materia es eléctricamente neutra se requiere que la carga negativa de los electrones quede cancelada por la existencia de cargas positivas.

¿Cuáles son éstas?...

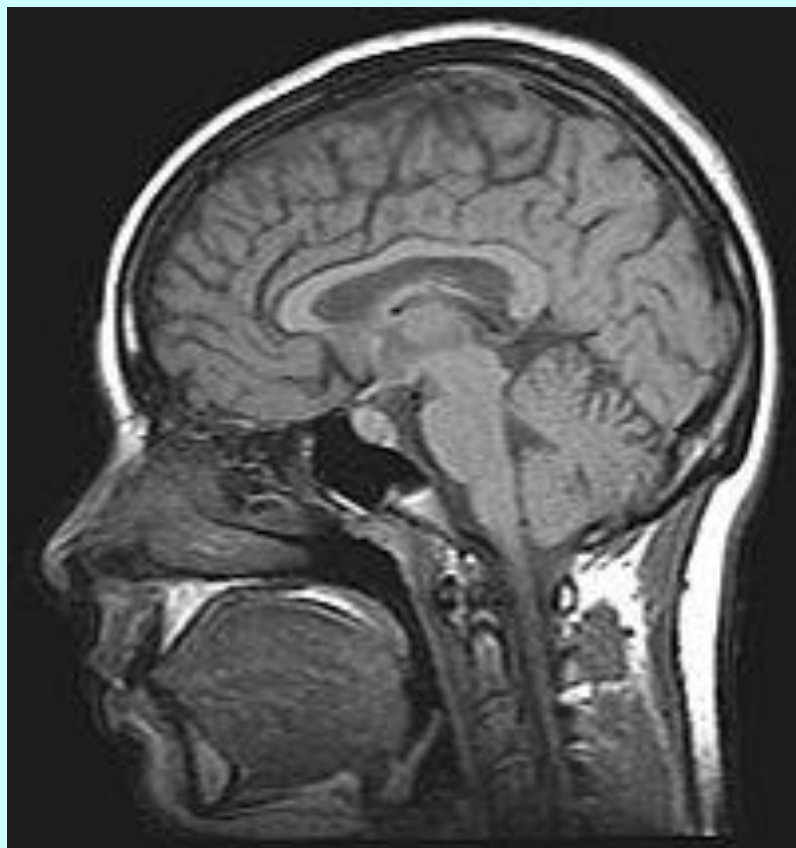
En diciembre de 1895 Wilhelm Conrad Röntgen dio a conocer su descubrimiento de los rayos X. Fue un fenómeno de masas.



La primera foto de Rayos X hecha por Röntgen a la mano de su mujer

Revolucionó la medicina y recibió el primer premio nobel de Física en 1901

# Resonancia Magnética (medicina nuclear)





# Descubrimiento del Núcleo Atómico

Compuestos salían de R y chocaban en E.

E. Rutherford ~1910

H. Geiger, E. Marsden

- Iones conocidos salían de la fuente radiactiva R de Polonio y pasaban a través de E.
- M es un microscopio giratorio alrededor del eje formado por E
- Se contaban las partículas dispersadas según ángulo de giro

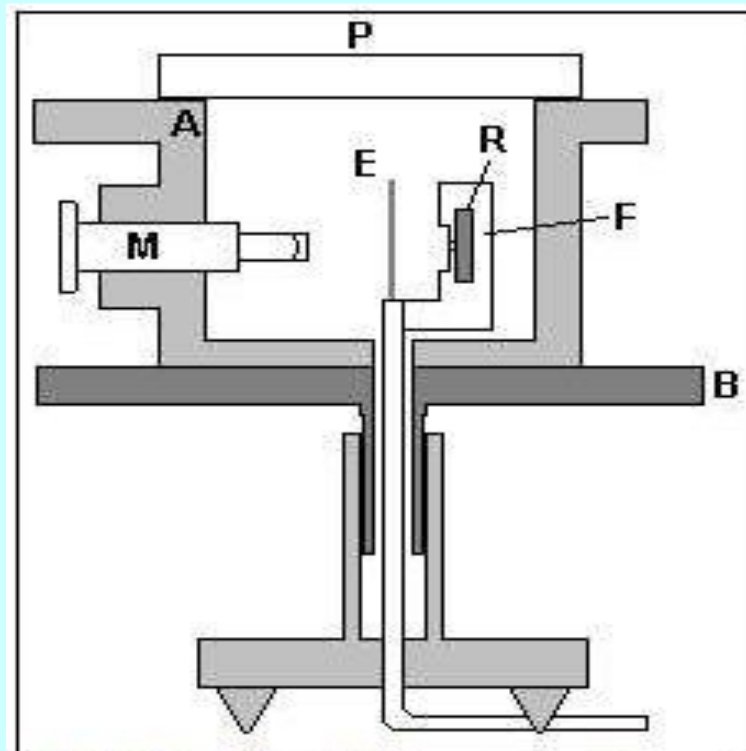


Fig1. Marsden-Geiger experiment.

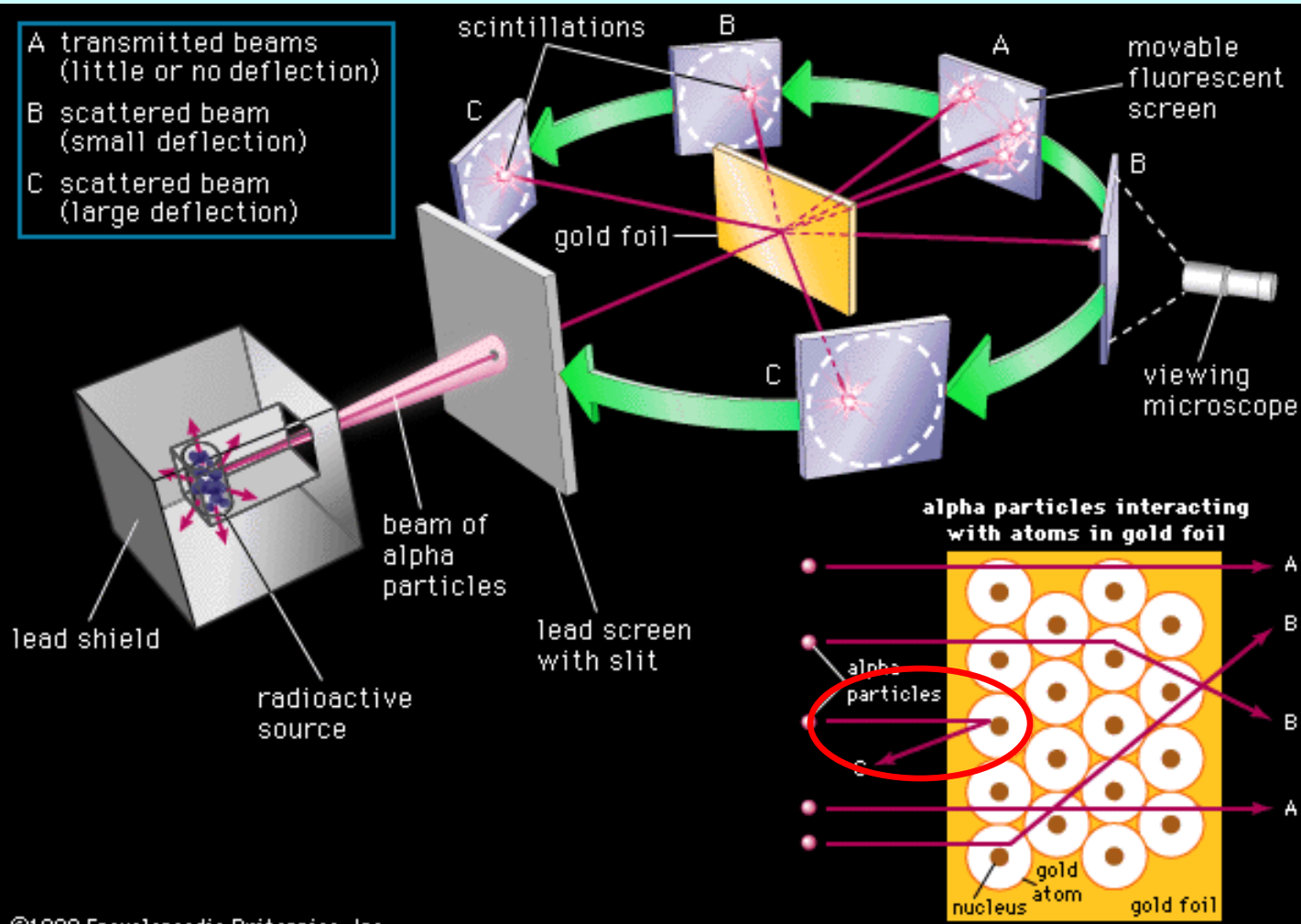


# Descubrimiento del Núcleo Atómico

## E. Rutherford

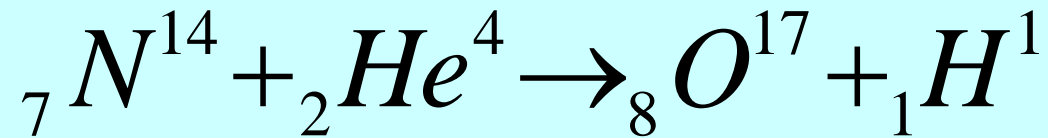
~1910

- El radio del núcleo es alrededor de unas 10000 veces el del átomo
- Contiene toda la masa y tiene carga positiva  $+Ze$



# Descubrimiento del Protón

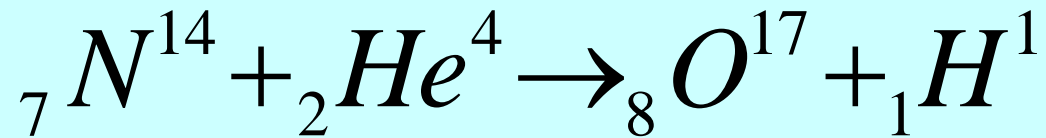
Rutherford en 1919 a través de reacciones como:



- Siempre aparecía el núcleo de Hidrógeno (H).
- Independiente de si era Nitrógeno (N) u otro núcleo, p.e. Boro, Fluor, Neón, Sodio etc...,

# Descubrimiento del Protón

Rutherford en 1919 a través de reacciones como:



- Siempre aparecía el núcleo de Hidrógeno (H).
- Independiente de si era Nitrógeno (N) u otro núcleo, p.e. Boro, Fluor, Neón, Sodio etc...
- Se concluyó que el núcleo de Hidrógeno era uno de los componentes fundamentales de todos los núcleos y se le llamó **PROTÓN**



Se disponía entonces de electrones (e) y protones (p) como partículas fundamentales descubiertas.

Se desarrolló una teoría de amplia aceptación según la cual los núcleos atómicos están formados de e y p.

Por ejemplo, el carbono tiene  $Z=6$  y peso  $A=12$ .

Entonces constaría de 12 protones. Esto da su masa.

Su carga  $Q=+6$  vendría dada por la cancelación entre las cargas de los 12 protones y de 6 electrones que estarían en el núcleo también.

Este modelo del núcleo atómico fue desechado porque finalmente se demostró que conducía a predicciones erróneas.

El modelo del núcleo según el cual éste está formado por protones y neutrones es posterior. Dada la dificultad que hubo en detectar los neutrones.

# Descubrimiento del neutrón

J. Chadwick, 1932

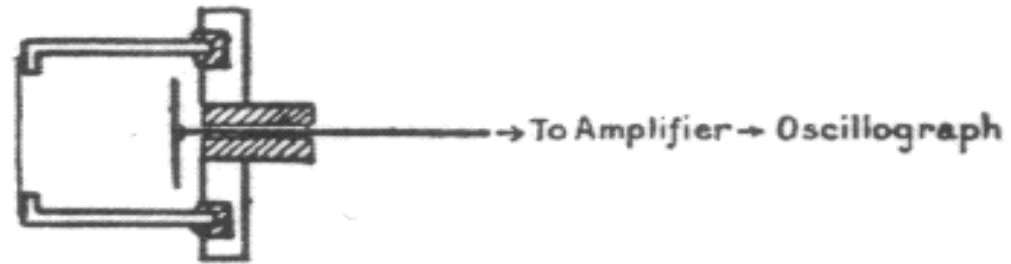
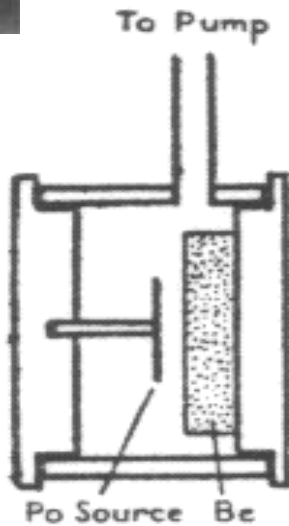


FIG. 1.

Po: partículas alfa chocaban contra Be (Berilio)

En el extremo opuesto se observaban la emisión de gran cantidad de protones

¿Qué hay entre medias?

# Descubrimiento del neutrón

J. Chadwick, 1932

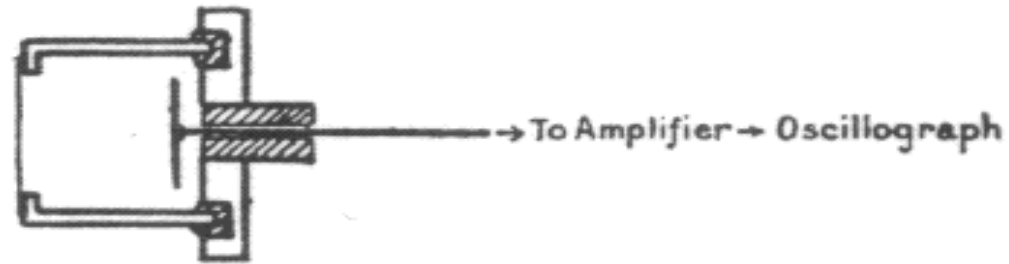
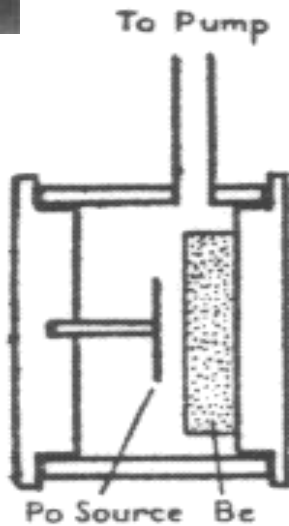


FIG. 1.

¿Qué hay entre medias? Radiación de partículas neutras de masa muy similar a la del protón. **NEUTRÓN**

# Periodic Table of the Elements

1A	1	H	2A	2	He	0																																
	3	Li	4	Be	5	6	7	8	9	10																												
	11	Na	12	Mg	13	14	15	16	17	18																												
	19	K	20	Ca	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																		
	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	43	Mo	44	Tc	45	Ru	46	Rh	47	Pd	48	49	Ag	50	Cd	51	In	52	Sn	53	Sb	54	Te	55	I	56	Xe
	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	81	Hg	82	Tl	83	Pb	84	Bi	85	Po	86	At	87	Rn	
	87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	Sg	107	Ns	108	Hs	109	Mt	110	110	111	111	112	112	113	113												

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
* Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Mayor Tamaño

Menor Tamaño  
Constituyentes  
más elementales

Los distintos elementos químicos se originan de acuerdo al número de protones que hay en el correspondiente núcleo. Este número se conoce como el número atómico. **A este nivel tenemos sólo tres “partículas elementales”**: el **protón**, el **neutrón** y el **electrón**. Después tenemos también la luz que surge al desintegrarse el átomo y pasar de un estado de más alta energía a otro de menor emitiendo luz (fotones).

W. Heisenberg, incluso con anterioridad al descubrimiento directo del neutrón, estableció la teoría de que el núcleo atómico se compone de protones y neutrones.

W. Heisenberg fue uno de los padres de la Mecánica Cuántica.

Así mismo estableció ciertas propiedades sobre el tipo de interacción que mantiene unidos protones y neutrones en el núcleo.

Se denominan interacciones fuertes porque son las interacciones más intensas de la naturaleza. Son mucho más intensas que las interacciones electromagnéticas.

Los protones tienen la misma carga y se repelen al estar confinados en una región tan pequeña como el núcleo atómico. Gracias a la interacción fuerte se vence esta repulsión y el núcleo atómico existe.

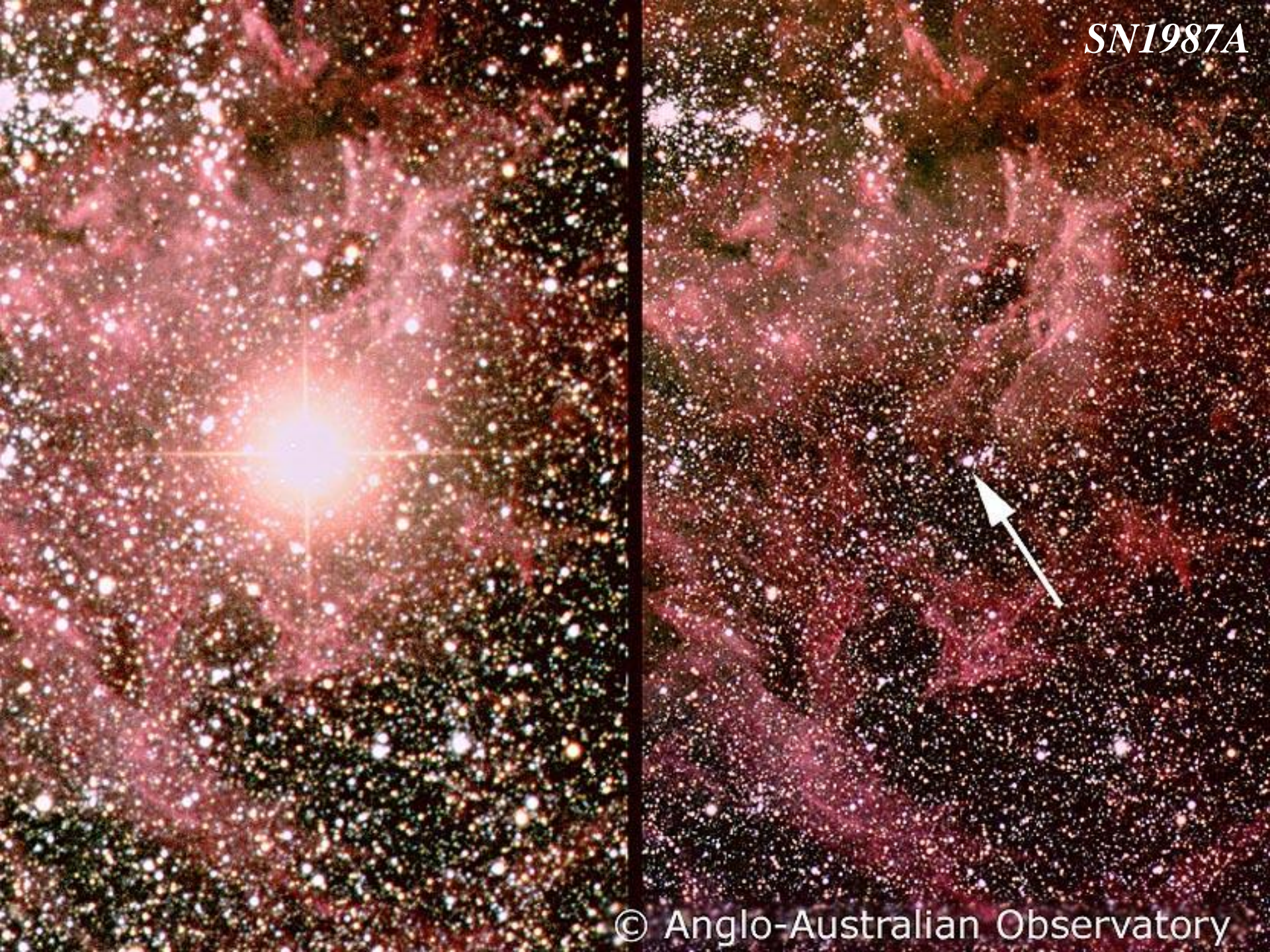
A nuestro alrededor no sentimos la presencia de tales fuerzas. Sólo de la interacción gravitatoria y electromagnética.

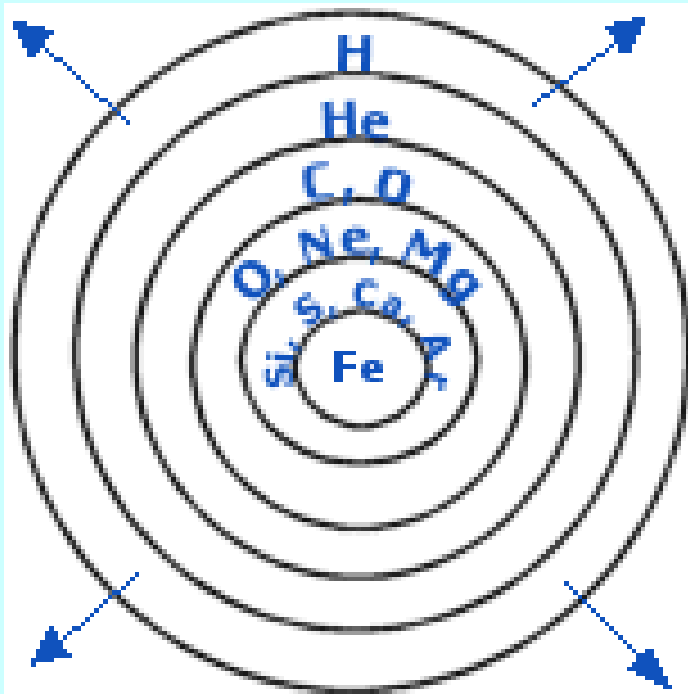
Las interacciones fuertes actúan sólo en distancias del tamaño del núcleo atómico. Son fuerzas de muy corto alcance.

Si no son de tan corto alcance, ¿cómo se han generado los núcleos? ¿qué ha llevado a protones y neutrones a acercarse tanto para formarlos?

**Nucleosíntesis.** Se requieren temperaturas altísimas (que implica altísimas presiones al estar el volumen fijo  $PV=NRT$ ) que sólo se dan en el centro de las estrellas (16 millones de grados en el centro del Sol, núcleos ligeros) y en fenómenos estelares muy violentos como en supernovas (mayores por un factor mil, núcleos pesados).

*SN1987A*





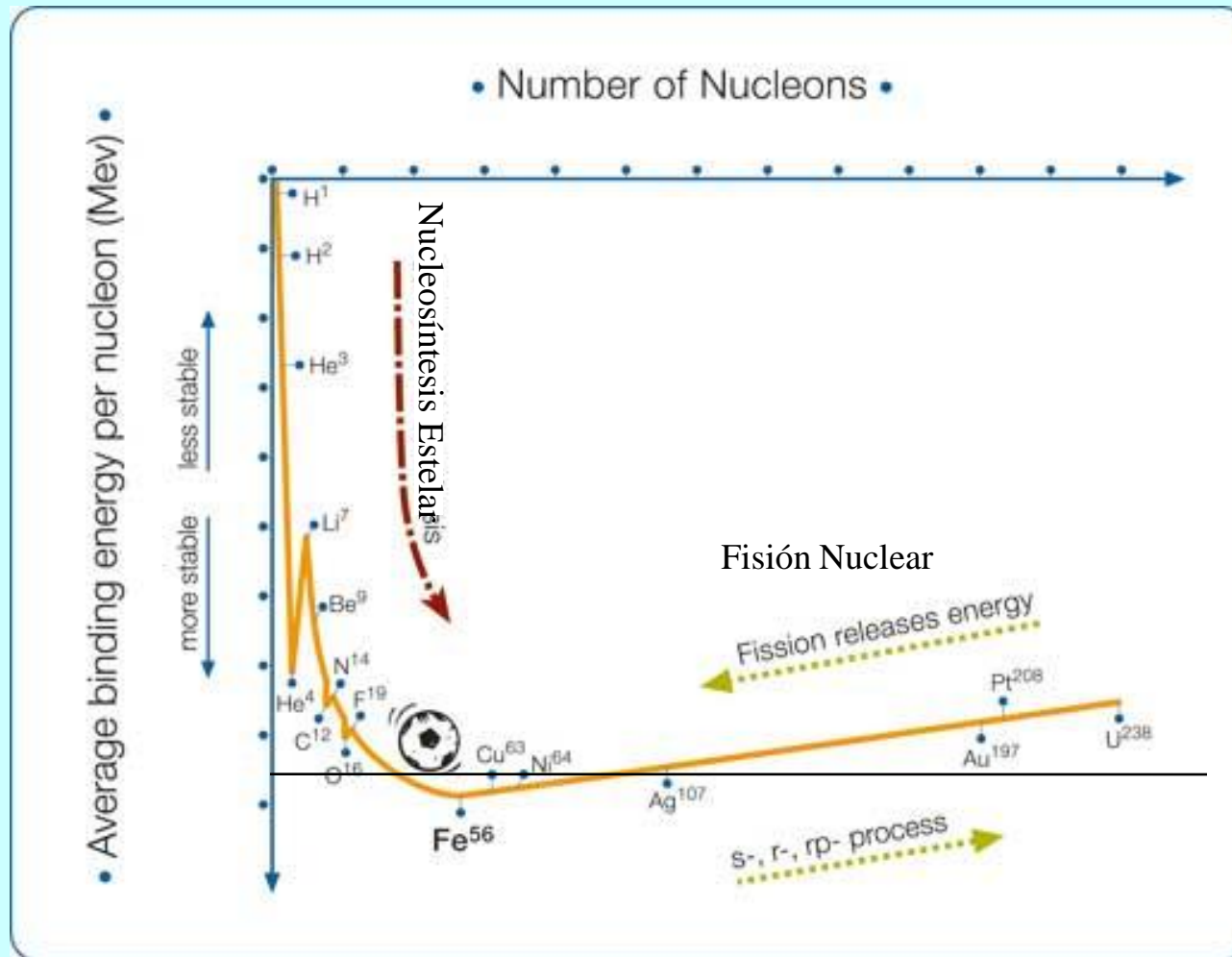
La formación de núcleos más pesados requiere de mayores temperaturas y se concentra en el centro de la estrella.

El núcleo de hierro es el más estable y entonces se deja de “fabricar” (fusión nuclear) otros núcleos más pesados.

Cuando se consume el combustible nuclear (el núcleo de hierro de la estrella se hace cada vez más grande) entonces se produce el colapso gravitatorio y se inicia el proceso de explosión que da lugar a la supernova.



En la explosión se produce la formación de núcleos más pesados al poder ser juntados núcleos de hierro, y más ligeros, dado la enorme energía que se pone en juego durante el fenómeno... así se originaron todos los núcleos más pesados que hay en la tierra.



8 MeV

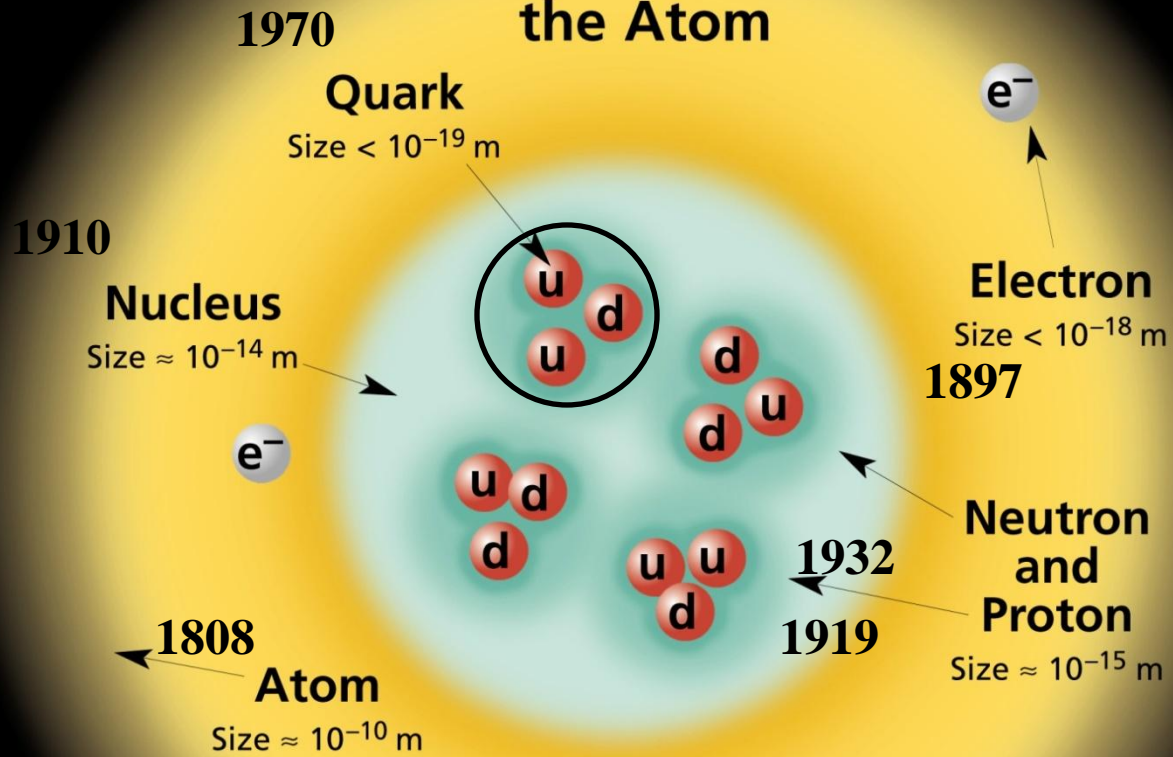
Los núcleos son cúmulos de energía que proceden de los procesos físicos más violentos que tienen lugar en el Universo, en el centro de las estrellas y en las explosiones de las mismas.

Las fuentes de energía como quemar madera, carbón, petróleo, fotoeléctrica, eólica, hidroeléctrica, etc se basan en transformar la energía que procede de la superficie del Sol. Ahí la temperatura es de unos 6000 grados.

Sólo el conocimiento proporcionado por la Física Nuclear ha permitido al hombre acceder a las energías mucho mayores que se almacenan en los núcleos atómicos.

Enrico Fermi construyó el primero reactor de fisión nuclear en la Universidad de Chicago.

# Structure within the Atom



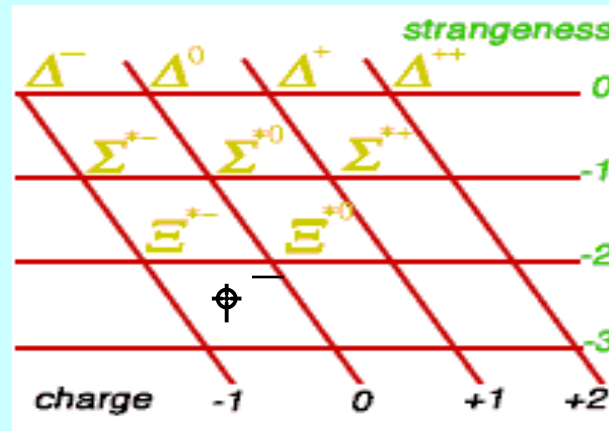
If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.



# Quarks

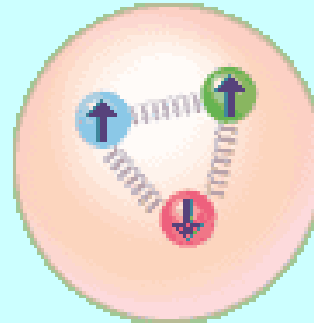
Fueron Predichos Teóricamente en 1961 por M. Gell-Mann y Y. Ne'eman.

- Permitían agrupar la gran cantidad de partículas descubiertas en los años cincuenta en grupos con propiedades similares así como justificar y predecir muchas de sus propiedades.
- Es lo que se conoció como el **Eightfold-Way**

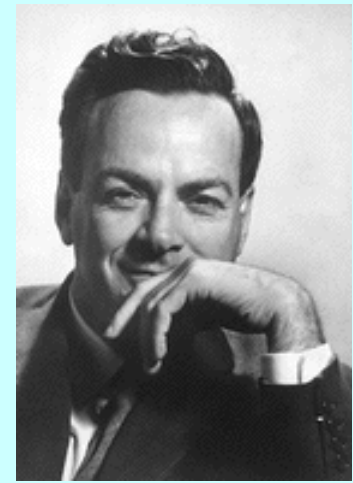


# Quarks

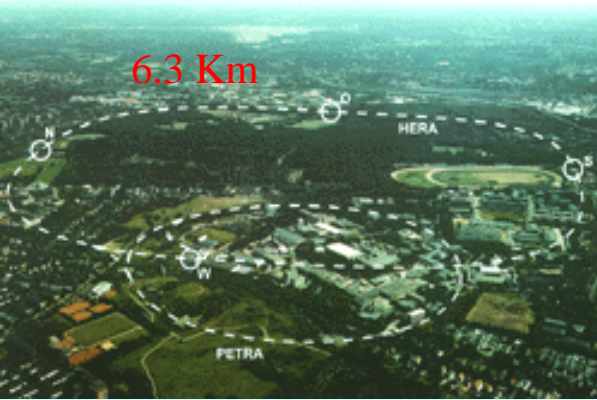
- Serían los constituyentes fundamentales del protón y neutrón.



- Debían tener carga eléctrica FRACCIONARIA:  $+2/3 e$ ,  $-1/3 e$
- Nunca se habían observado tales partículas.
- Feynman los denominó partones y desarrolló un modelo cuantitativo e intuitivo muy exitoso sobre su dinámica dentro del protón.



R. Feynman

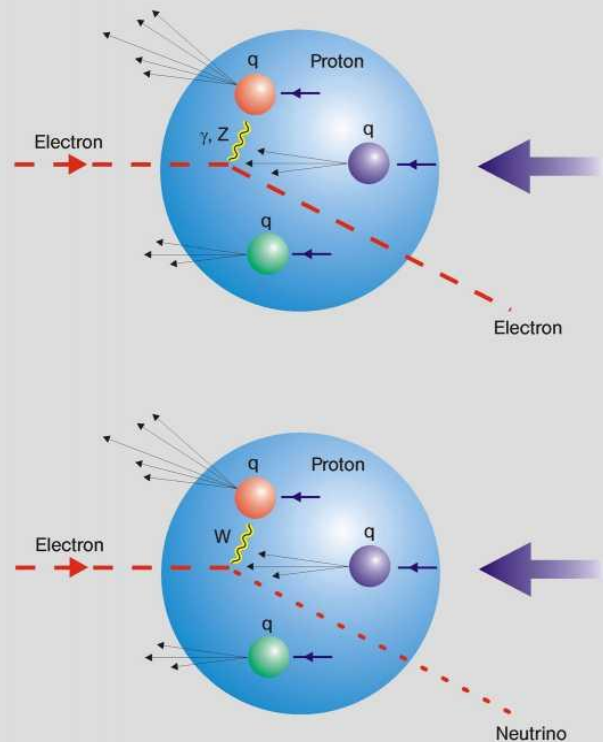


6.3 Km

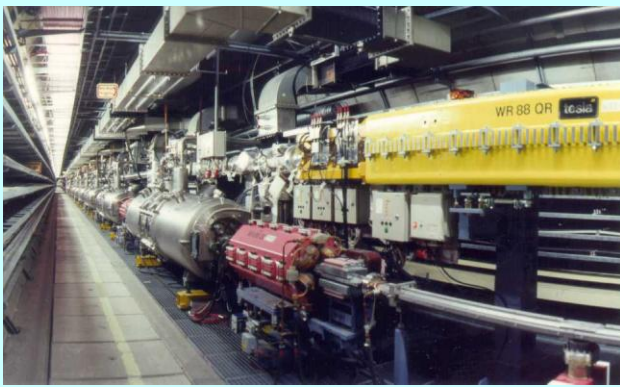
Deutsches Elektronen  
Synchrotron

# Quarks

- Fuerón observadas experimentalmente en colisiones electrón-protón en **DESY** (Hamburgo) hacia 1968.
- Los electrones tenían 20 GeV de energía  
 $\lambda \approx 10^{-10}$  Armstrong.

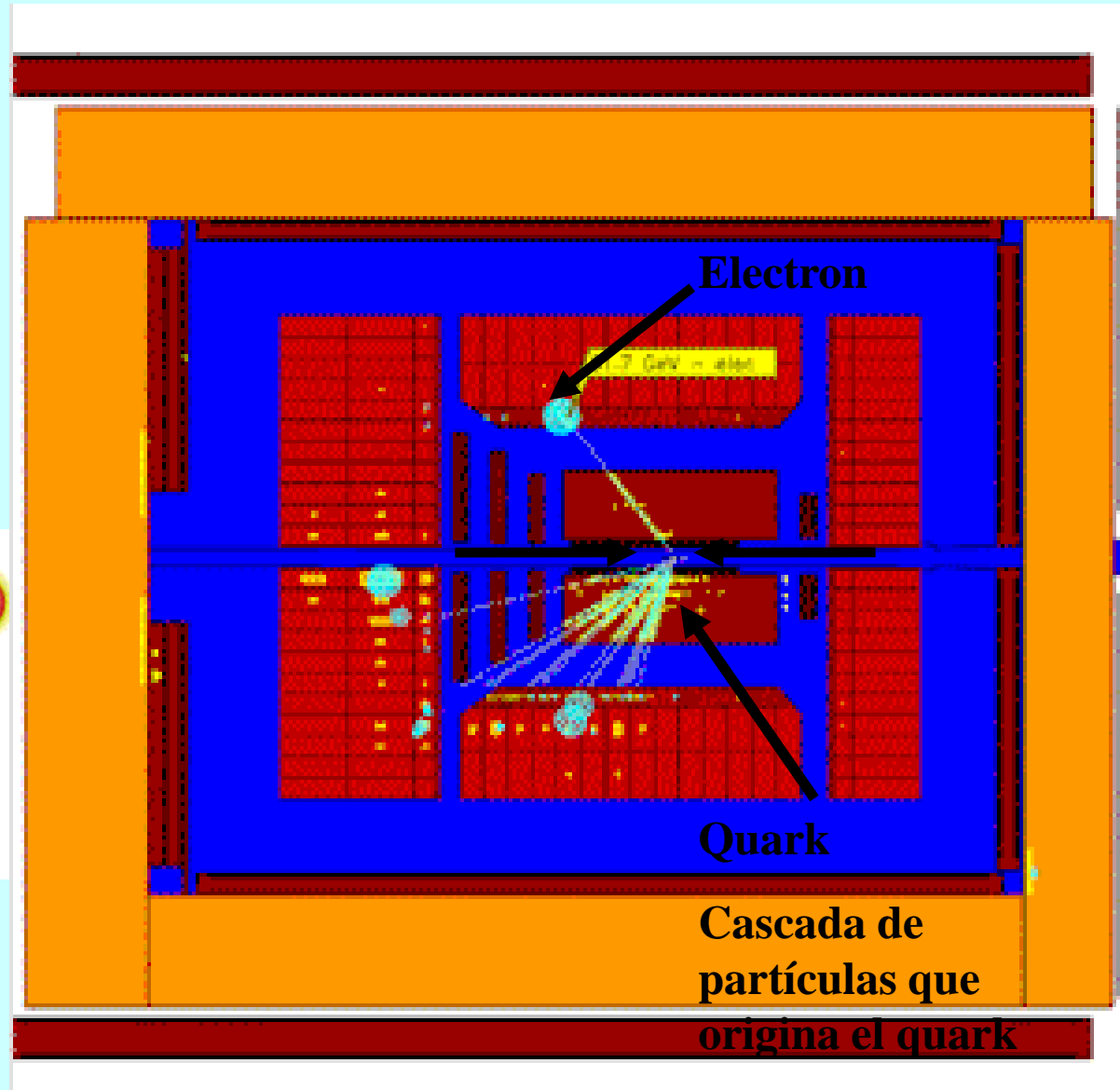
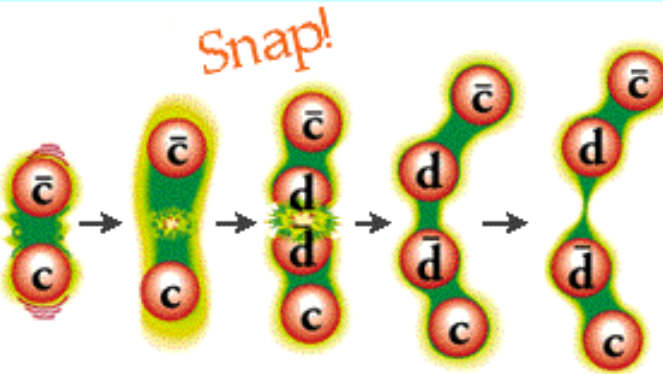


# Quarks

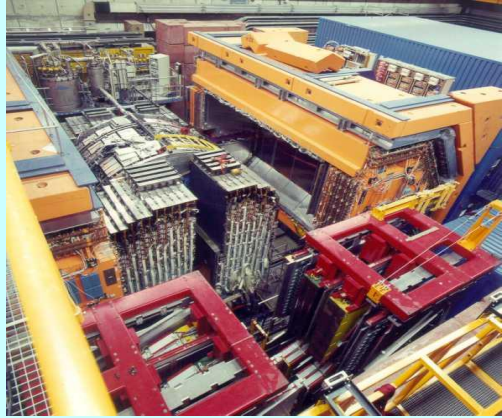


Deutsches Elektronen Synchrotron

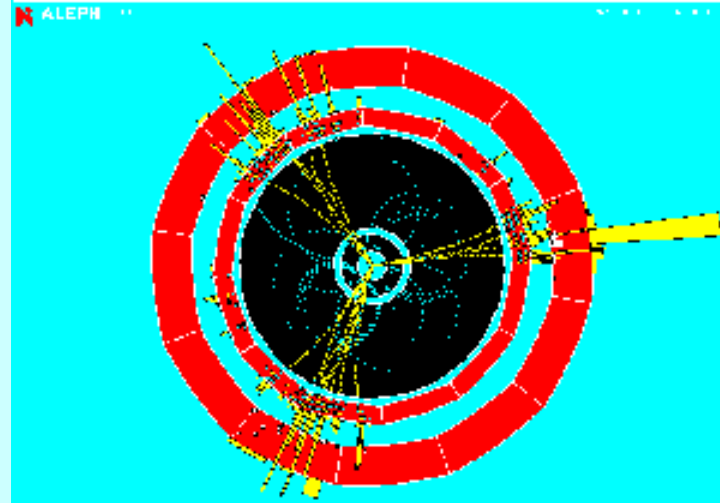
Los quarks están confinados, no se observan libremente como tales



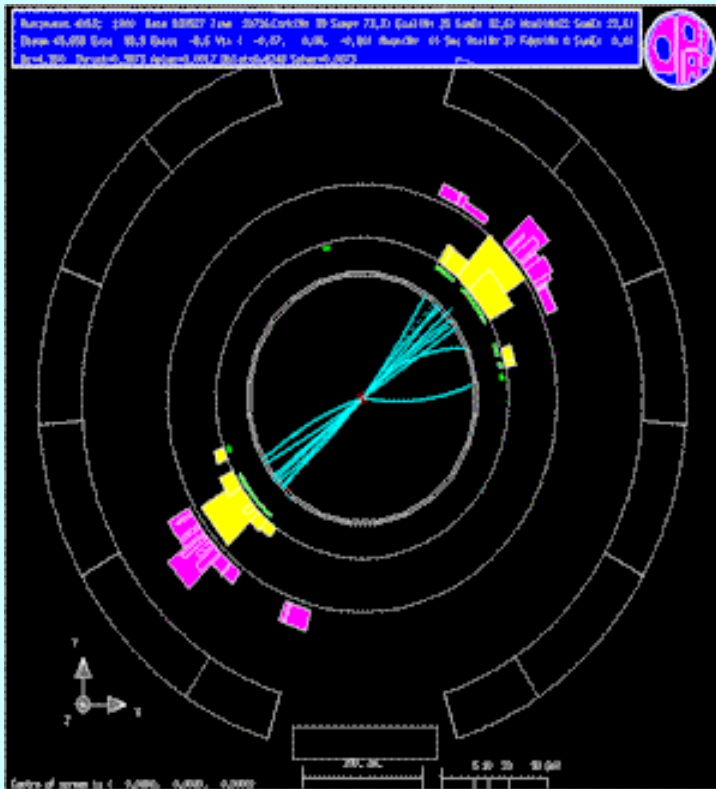
# Quarks



Detector ZEUS (DESY)



Producción quark-  
antiquark más gluón



Producción  
quark-antiquark



Los datos de colisiones de electrones con protones y que llevaron a R. Feynman a interpretar que el protón se componía de quarks fueron tomados en SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)

Pasa por ser la construcción más recta sobre la Tierra. 3.2 Km.



160000 Voltios/cm

En un rayo: 3000 Voltios/cm (ruptura de dieléctrico del aire)

Un acelerador de partículas además es un campo de pruebas donde la tecnología se lleva más allá de sus límites presentes.

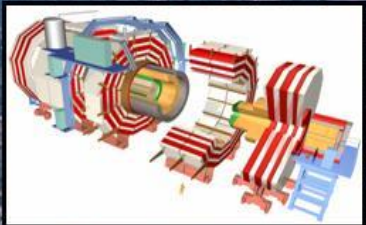
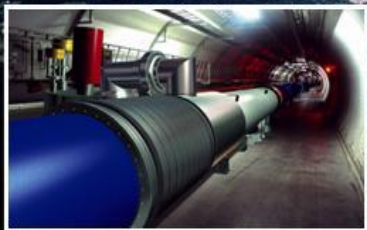
El futuro de los aceleradores ya está aquí...

## **LHC** (Large Hadron Collider)

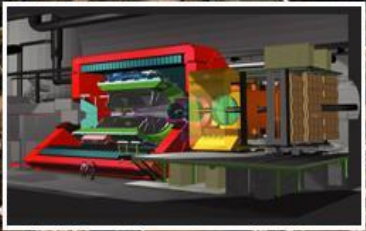
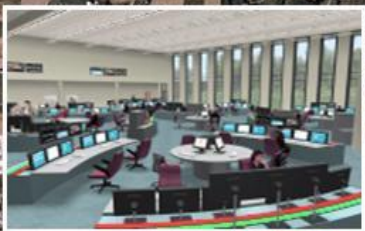
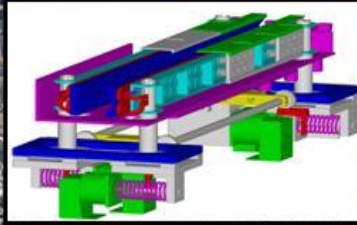
Está construido en el **CERN** (organización europea para la investigación nuclear), Ginebra (Suiza).

En el LHC participan 34 países. Coste de 200 millones de euros. Su proyecto se inició en 1981 y ahora es cuando se concluye. Comenzó a funcionar hace unos meses pero un fallo humano hizo que parara y se espera que vuelva a funcionar el otoño próximo.

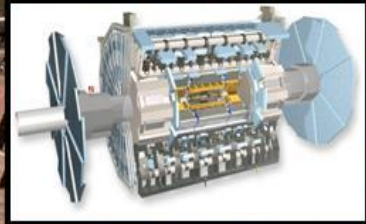
Consta de un anillo de 27Km de diámetro (4.3 Km de radio) que transcurre a una profundidad de entre 50 y 170 m.



CMS



ALICE



ATLAS



LHCb

Objetivo fundamental del LHC es descubrir el origen de las masas de las partículas elementales.

¿Por qué un electrón tiene una masa de  $0.511 \text{ MeV} = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ ?

¿Por qué un quark top tiene una masa de  $170 \text{ GeV} = 3 \cdot 10^{-25} \text{ Kg}$ ?

No es nada cómodo admitir que ambas partículas sean igualmente “elementales” y que haya una disparidad en la masa de tantos órdenes de magnitud... algo se está escapando. Esto recuerda a la disparidad entre los distintos elementos químicos que refleja la tabla de Mendeleev, pero ahora aplicado a nuestro conocimiento actual de las partículas “fundamentales”.

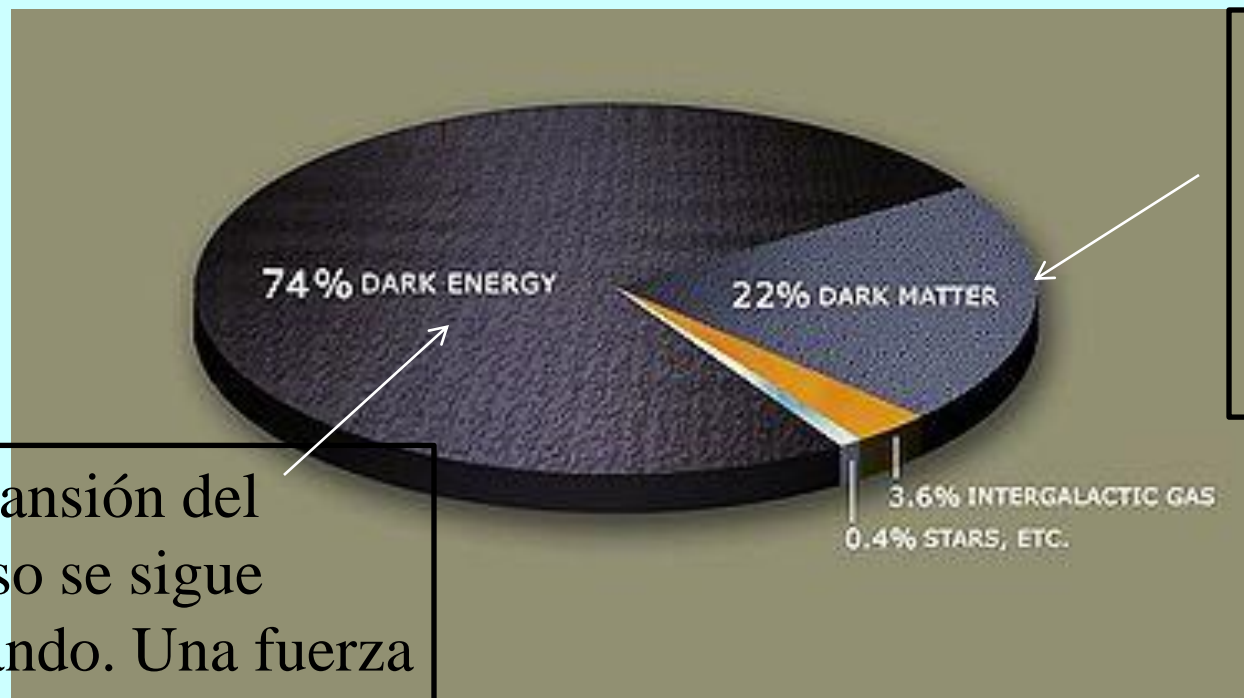
Para llegar a responder a esa pregunta y otras similares se necesita ir a energías enormes de colisión entre protones que tendrán lugar en el LHC.

Se conseguirán temperaturas de 6 billones de grados colisionando frontalmente núcleos de Pb (plomo). Estas temperaturas (¡un millón de veces la que hay en el centro del Sol!, ¡1000 veces la de una supernova!) no se han alcanzado en el universo hasta en el mismo comienzo del Big Bang (un millonésima de segundo después del mismo).

**Todo esto en un LABORATORIO TERRESTRE.**

Al reproducirse condiciones propias del origen del universo se pueden poner a prueba nuestras teorías sobre la evolución y origen del Universo (número de dimensiones espaciales, generación de mini-agujeros negros,...) y por supuesto de la materia misma (¿por qué no hubo en igual cantidad materia y antimateria y sencillamente se aniquilaron?).

Se espera producir y detectar “Materia Oscura” (Dark Matter) en el LHC



Se requiere de más materia que la visible en las galaxias para explicar por ejemplo su elevada velocidad de rotación

La expansión del universo se sigue acelerando. Una fuerza gravitatoria repulsiva.

No sabemos hoy en día qué es el 86% de la materia y energía ( $E=mc^2$ ) que forman el Universo. Al tener en un laboratorio a nuestra disposición mini-Big Bangs es muy probable que esta situación cambie y mejore mucho nuestra comprensión de este problema fundamental.