

---

# **Introducción a la Física de Partículas - II**

**Dr. C. Javier Solano S.**

**Instituto de Física**

**Universidad Nacional de Ingeniería**

---

# Física Moderna

---



Dos revoluciones científicas que dieron origen a la Física moderna ocurrieron en la primera mitad del siglo 20.

Estos avances se produjeron cuando los físicos trataron de extender las leyes de la Física más allá de la experiencia cotidiana.



# Relatividad

Para describir cosas moviéndose **muy rápido** se requiere de la teoría de la relatividad.

## Relatividad Especial

- No podemos alcanzar a la luz.
- Masa es una forma de energía

$$E = m c^2$$

## Relatividad General

- GR abarca gravedad y describe el universo en expansión y los agujeros negros.



Einstein en 1905, a la edad de 26

# Mecánica Cuántica

---



Para describir cosas que son **muy pequeñas** se requiere Mecánica Cuántica.

El principio de incertidumbre de Heisenberg:

- Mientras conozcamos la posición de un objeto con mayor precisión, peor será nuestro conocimiento de su momento.

Para describir cualquier cosa tan pequeña como un átomo se requiere el uso de la Mecánica Cuántica.

---



Heisenberg en 1925, a la edad de 24

# Nuestra teoría actual de Física de partículas: El Modelo Estándar

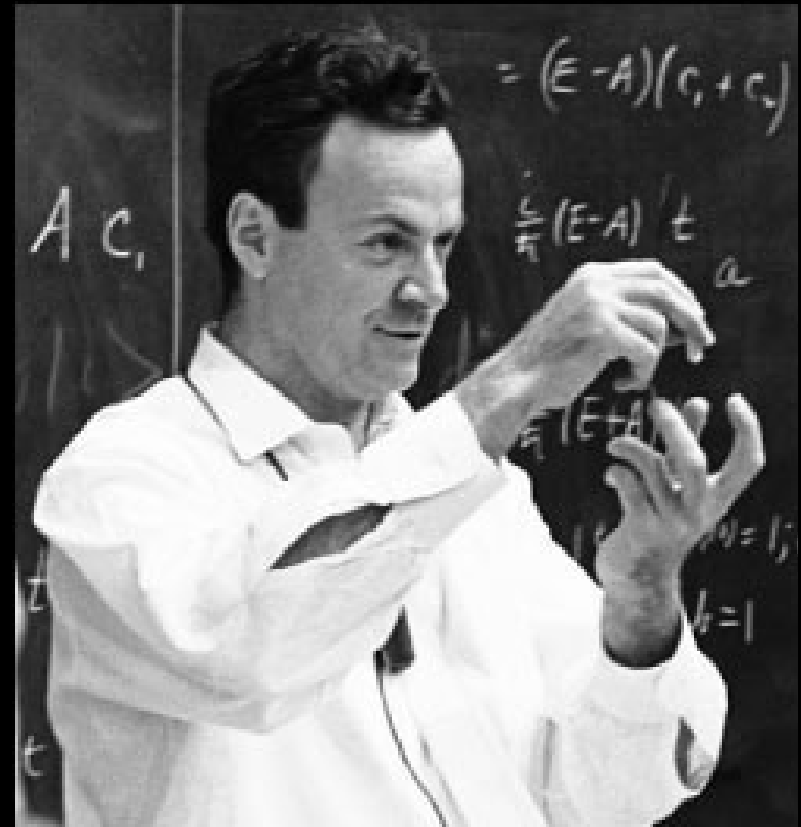


## Estándar

Este es un gran logro intelectual de la segunda mitad del siglo 20

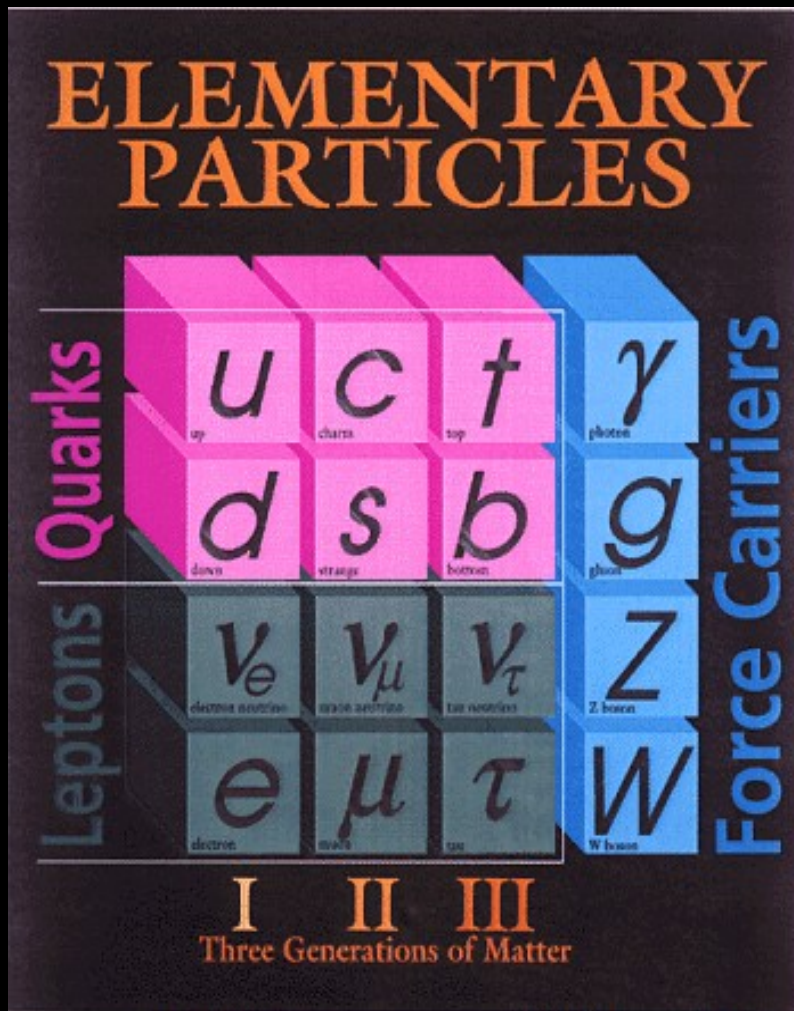
La teoría esta basada en Teoría Relativista de Campos Cuánticos (QFT)

- La primera QFT fue la teoría cuántica de electricidad y magnetismo



Feynman ca. 1960

# Las Partículas Elementales (que conocemos hasta ahora)



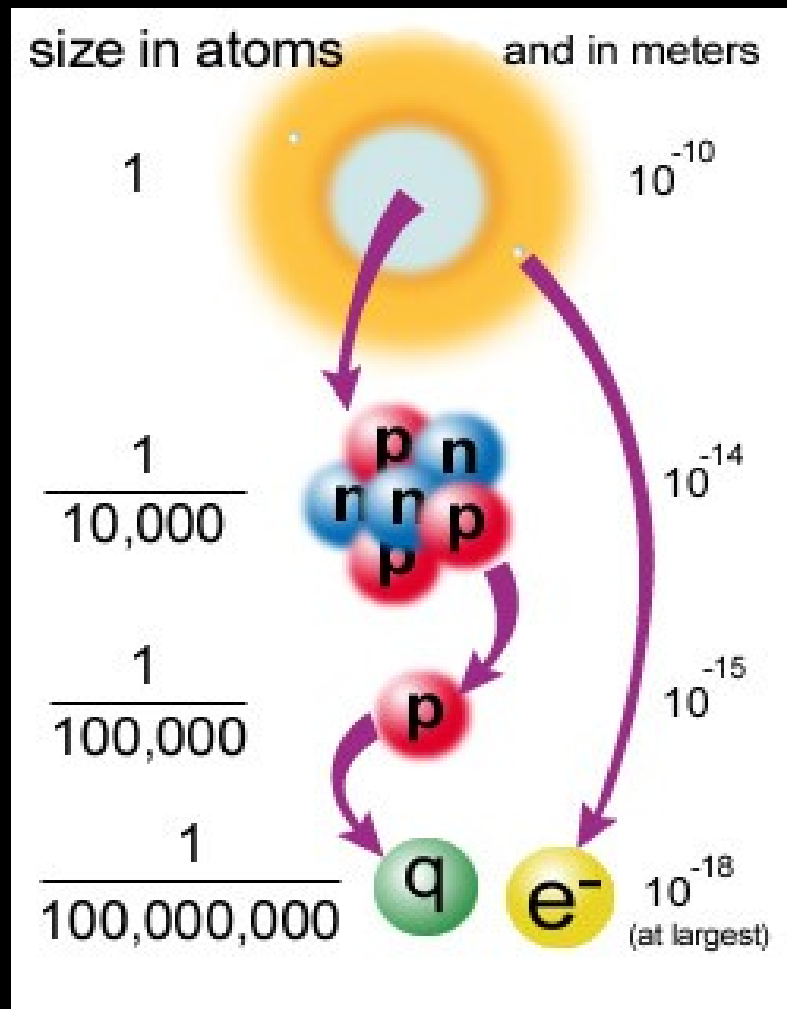
27 físicos de partículas ganaron el Nobel por descubrimientos experimentales y avances teóricos que llevaron a nuestro conocimiento presente

El boson de Higgs?

La teoría actual describe las fuerzas y partículas conocidas, con una excepción importante: gravedad



# Sentido de Escala



Para resolver objetos muy pequeños, necesitamos el uso de muy alta energía.  
(Heisenberg de nuevo)



Por esto tenemos aceleradores gigantes.



Colisiones a energías muy altas crean nuevas partículas  
( $E=mc^2$  de nuevo)

# Mecánica Cuántica y

## Gravedad

---



A escalas muy pequeñas, la teoría de Einstein de la gravedad falla. También falla dentro de los agujeros negros.



Necesitamos otra revolución científica para reconciliar la Mecánica Cuántica y la Relatividad General.

Esto deberá cambiar radicalmente nuestro entendimiento del espacio y el tiempo.

Próximos avances vendrán de experimentos.

Pero la teoría nos dirá donde y como buscar por esos avances.

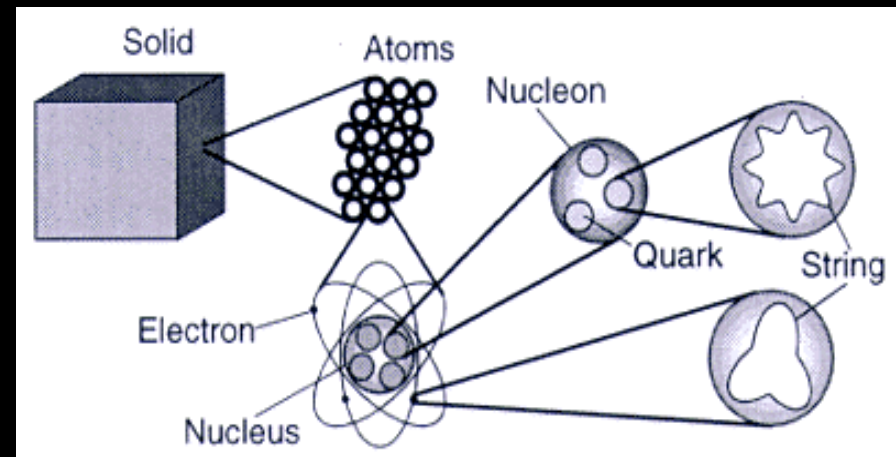


# Teoría de cuerdas



Teoría de cuerdas parece ser ambos, una teoría cuántica consistente de la gravedad y una teoría unificada de todas las partículas y fuerzas.

- Todas las partículas son diferentes vibraciones de un único tipo de cuerda.
- La teoría única de cuerdas cuánticas necesita 10 dimensiones.



# Las Grandes Preguntas de la Física de Partículas

---



- Porqué la gravedad es tan débil?
2. Existen dimensiones extras de espacio-tiempo?
- Qué es la materia oscura?
  - Es la naturaleza supersimétrica?
  - Qué es la energía oscura?
  - Porqué el universo solo quedó hecho de materia?
7. De donde viene la masa de los neutrinos?
- Qué causa el misterioso campo de Higgs?

# 1. Porqué la gravedad es tan débil?



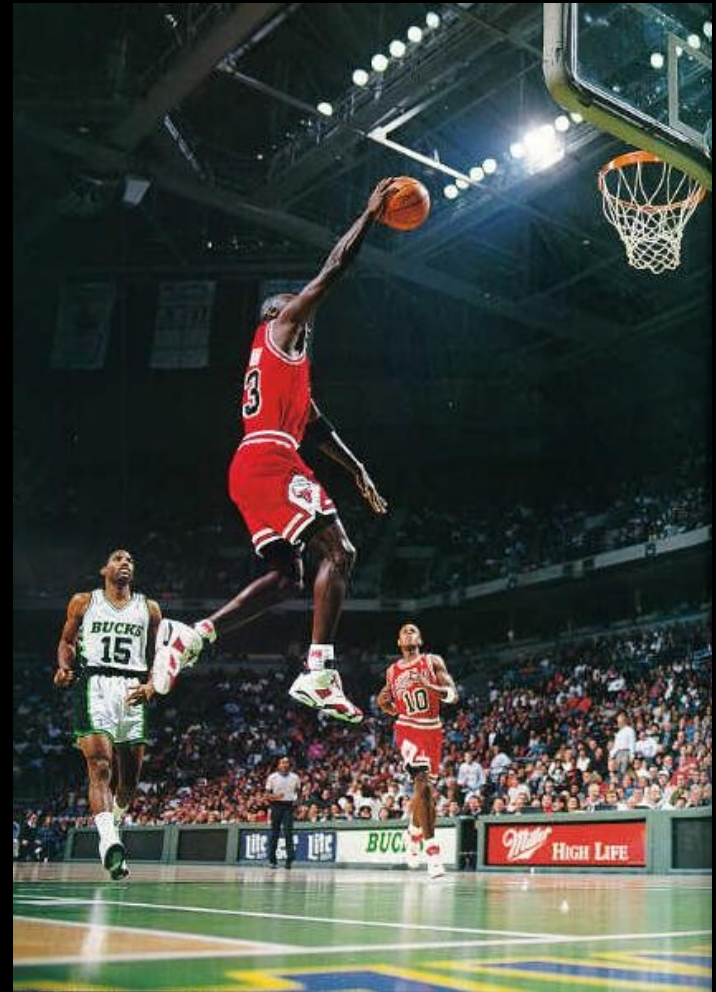
La fuerza gravitacional entre dos electrones es 42 ordenes de magnitud mas débil que la fuerza eléctrica entre ellos

–  $10^{42} =$

1,000,000,000,000,000,000  
,000,000,000,000,000,000,  
000,000

Todas las otras fuerzas son de un orden parecido al de la fuerza eléctrica

Se nos está escapando algo

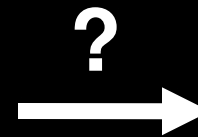


## 2. Existen dimensiones extras de espacio-tiempo?



Porqué los físicos piensan que podrían haber dimensiones extras?

- Teoría de cuerdas las necesita.
- Pueden servir para dispersar la fuerza intrínseca de la gravedad, haciéndola parecer débil para nosotros
- Podrían solucionar otros misterios de la Física de partículas.



**ELEMENTARY PARTICLES**

Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	

**Force Carriers**

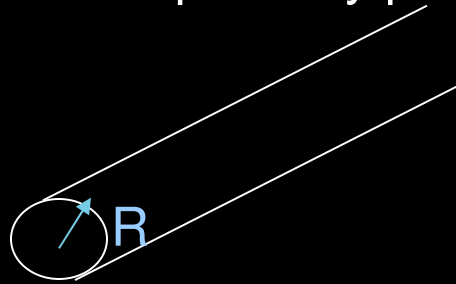
I II III  
Three Generations of Matter

# Dimensiones Extras



Por algún motivo, dimensiones extras son difíciles de verse.

Podrían ser compactas y pequeñas!



1 dimensión infinita

+ 1 dimensión pequeña

Pensamos que el tamaño de las dimensiones extras tendría que estar en la escala natural de la gravedad cuántica, la longitud de Planck  $\sim 10^{-35}$  m

Pero podría ser mayor, hasta  $10^{-18}$  m, y no lo habríamos observado con los experimentos existentes

# Cómo podríamos observar esas dimensiones extras?



Si una dimensión espacial extra es compacta, enrollada con tamaño  $R$ , veríamos nuevas partículas masivas tipo “Kaluza-Klein”  
 $m=1/R, 2/R, \dots$



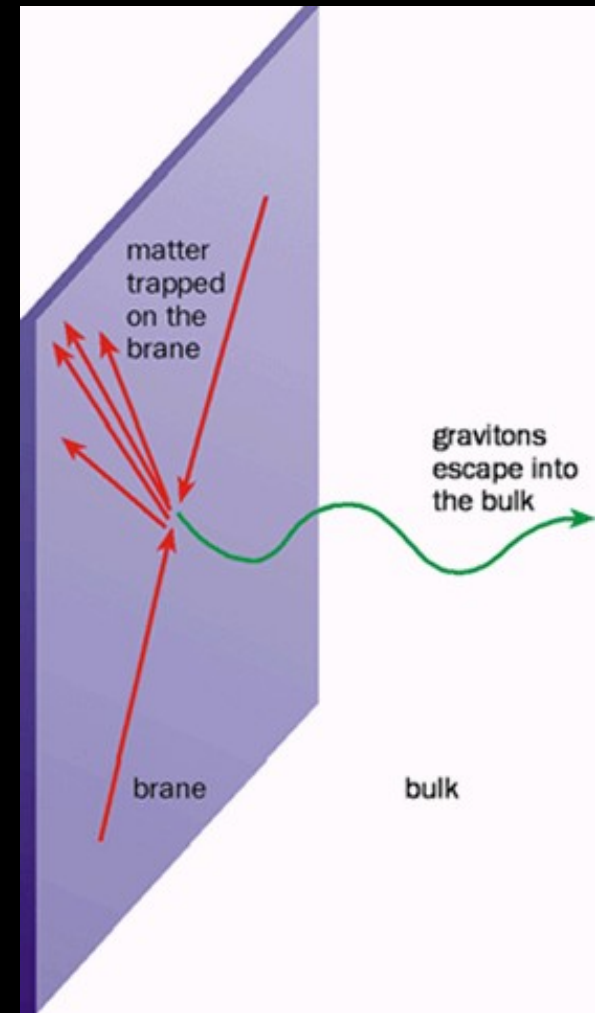
Podemos producirlas en los colisionadores si hay suficiente energía

# Vida en una hoja



En otra versión, las dimensiones extras son grandes, pero estamos atrapados en una membrana 3-dimensional en un espacio-tiempo de más dimensiones.

Solo la **gravedad** actúa en las dimensiones extras, que pueden ser de un tamaño macroscópico.



# Dimensiones Extras

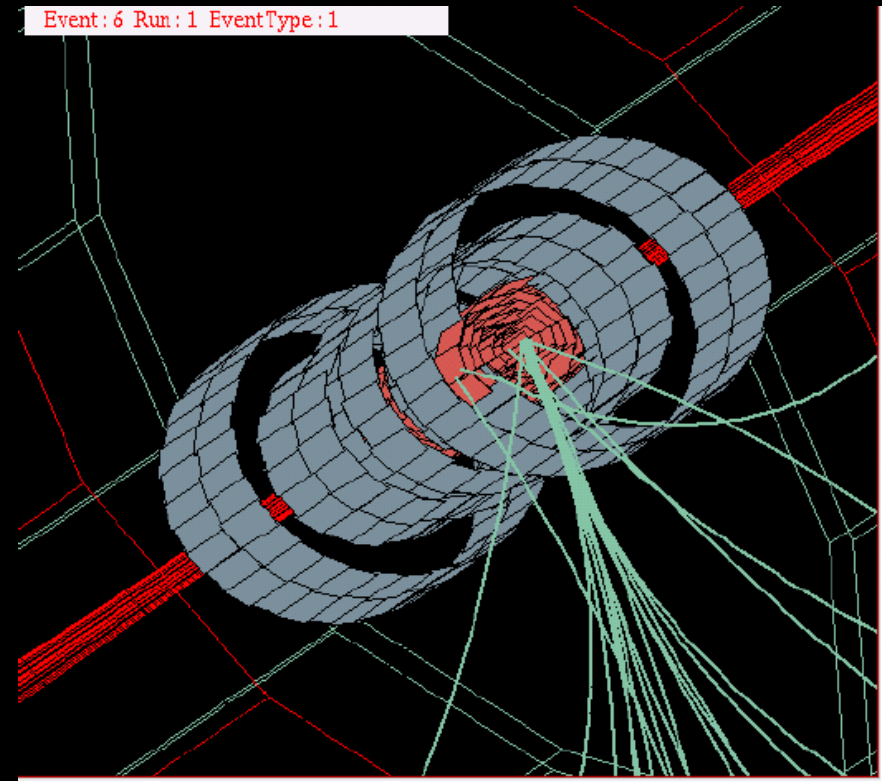


Dimensiones extras requieren de un gran salto en imaginación, como fue en la Mecánica Cuántica y Relatividad General.

Cambiaría nuestros conceptos de espacio y tiempo.

Ellas podrían existir, pero existen?

Si existen, podrían tener la escala de masa de 1 TeV.



Simulación de un graviton K-K opuesto a un jet de partículas en el detector CDF



# El primer experimento de partículas: El Big Bang



10 microsegundos

Quarks forman protones.

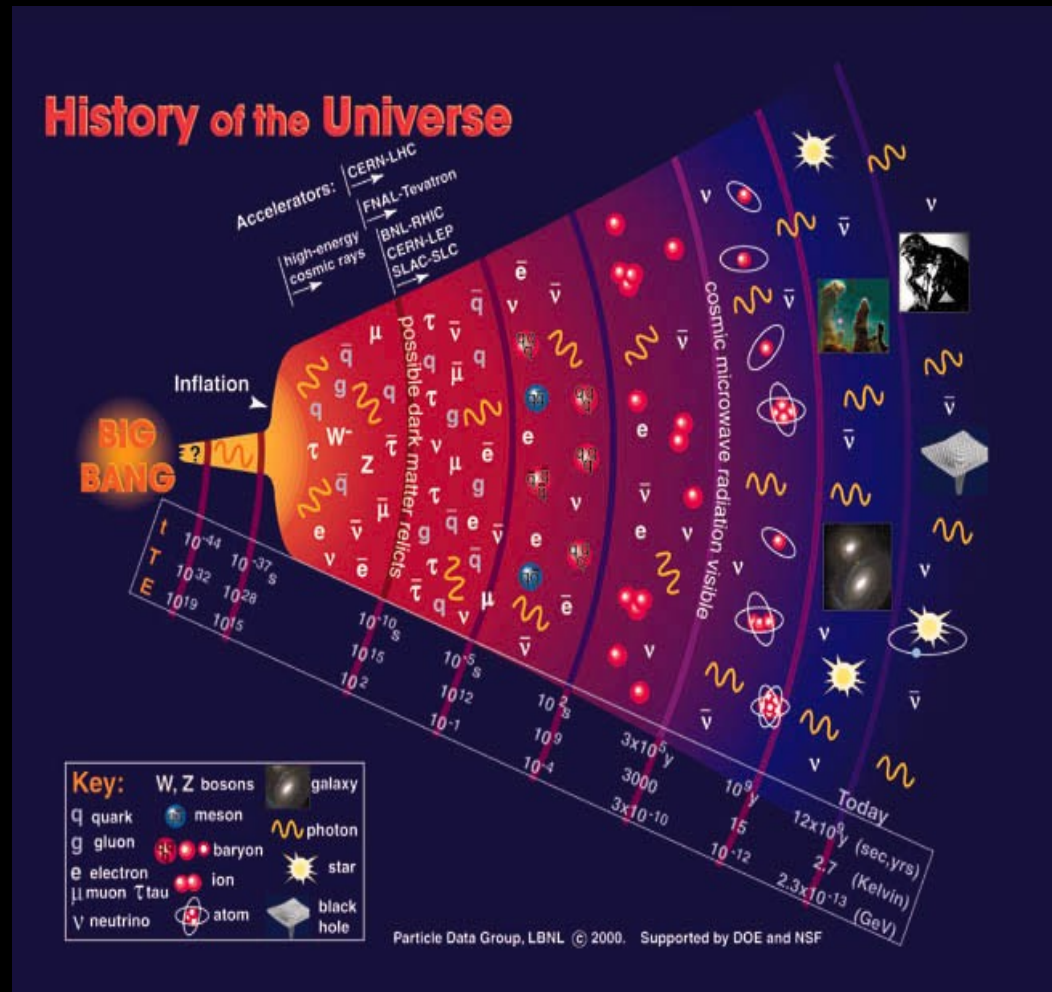
300,000 años

Núcleos capturan electrones y forman átomos.

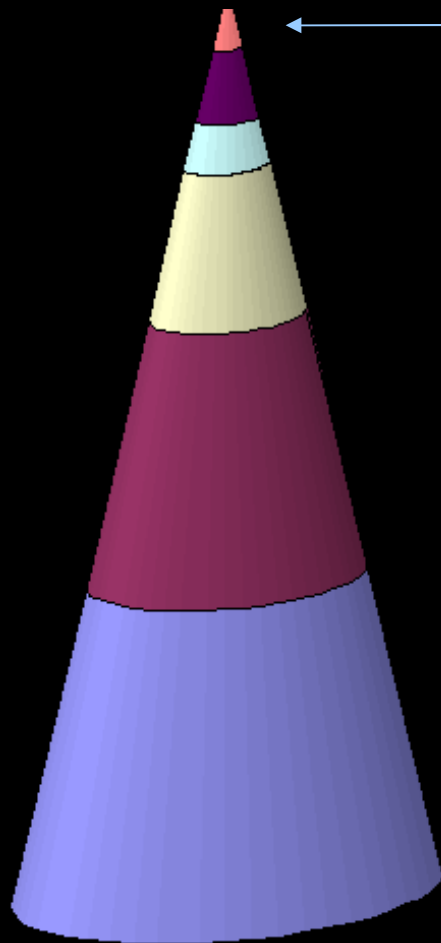
El universo se vuelve transparente.

13,700,000,000 años

Hoy día



# Composición del universo



Estamos aquí.

Other elements	0.03%
Neutrinos	0.3%
Stars	0.5%
Free H and He	4%
Dark matter	23%
Dark energy	72%

We do not know what makes up 95% of the universe.

# Materia Oscura (Dark Matter)



Vemos efectos gravitacionales de Materia Oscura a través de técnicas astronómicas

- Masa curva el espacio, flexionando la luz.

Pero sus propiedades no corresponden a ninguna partícula conocida.

**Materia Oscura es una nueva forma de materia**



Los grandes objetos azules son imágenes de una **galaxia distante**. El **cluster de galaxias** amarillo al frente y su halo de materia oscura actúa como un lente gravitacional

# 3. Qué es la Materia Oscura (Dark Matter)?

---



Para entender la materia oscura necesitamos estudiarla en experimentos controlados.

Estamos tratando de detectar sus muy débiles interacciones en la Tierra.

También estamos tratando de producirla con colisionadores, e identificar su naturaleza.

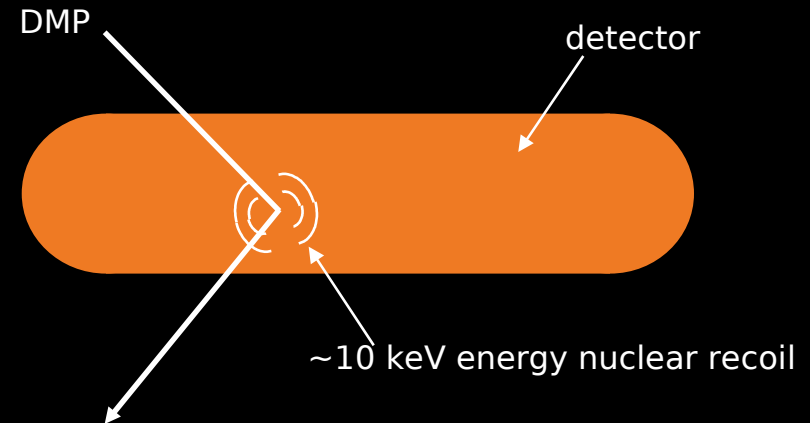
# Atrapando partículas de materia oscura en la naturaleza



Partículas de materia oscura son difíciles de verse

- 1 interacción por libra de material por año,
- Retroceso de núcleos con una pequeña energía.

Detectores muy sensitivos diseñados para materia oscura están operando en lugares subterráneos muy profundos



## DMP-Nucleus Scattering

Detector: cristal de germanio a 20 millikelvin, (.02 grados sobre el zero absoluto)

# 4. La naturaleza es supersimétrica?



“Supersimetría, si existe en la naturaleza, es parte de la estructura cuántica del espacio-tiempo”

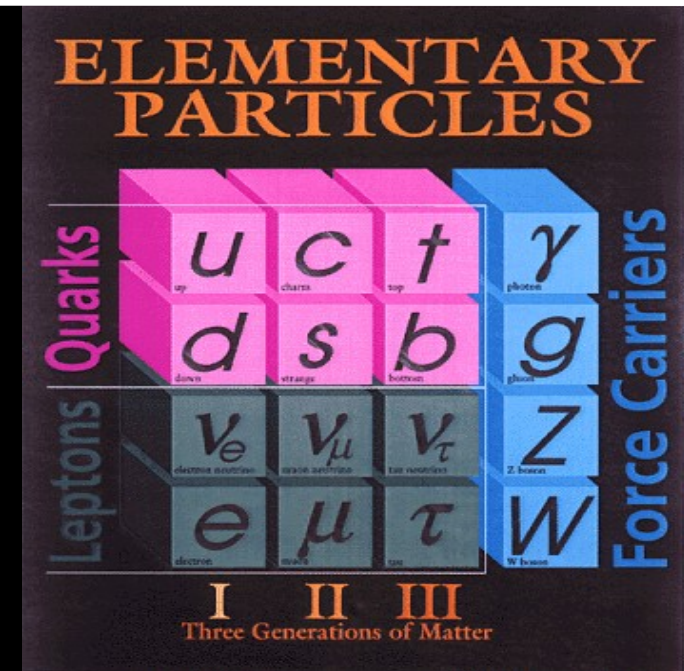
“Descubrimiento de la supersimetría iniciaría una revisión de las ideas de Einstein a la luz de la mecánica cuántica”

Es una firme predicción de la teoría de cuerdas

Esta elegante teoría describe la naturaleza?

Solo los experimentos lo dirán

partícula	superpartner
quark	squark
gluon	gluino
photon	photino



# La materia oscura podría ser supersimétrica

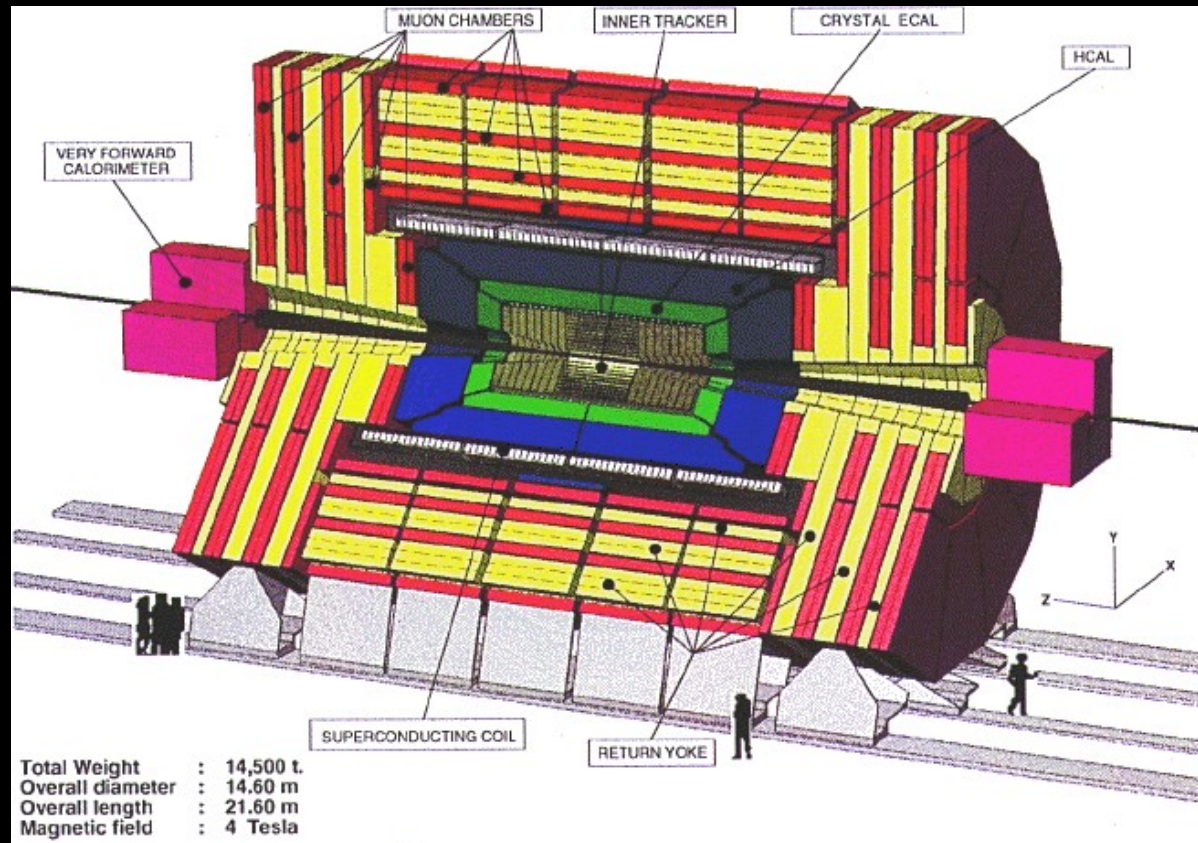
---



La partícula supersimétrica mas liviana (LSP) también es un candidato ideal para materia oscura.

- Probablemente es estable.
- LSPs producidos en el universo primogenio aún están dando vueltas por ahí
- si LSPs forman la materia oscura, entonces  $\sim 100$  de ellos están dentro de nosotros.

# Produciendo y observando partículas supersimétricas



Si un colisionador tiene energía suficiente para producir partículas supersimétricas, las veremos

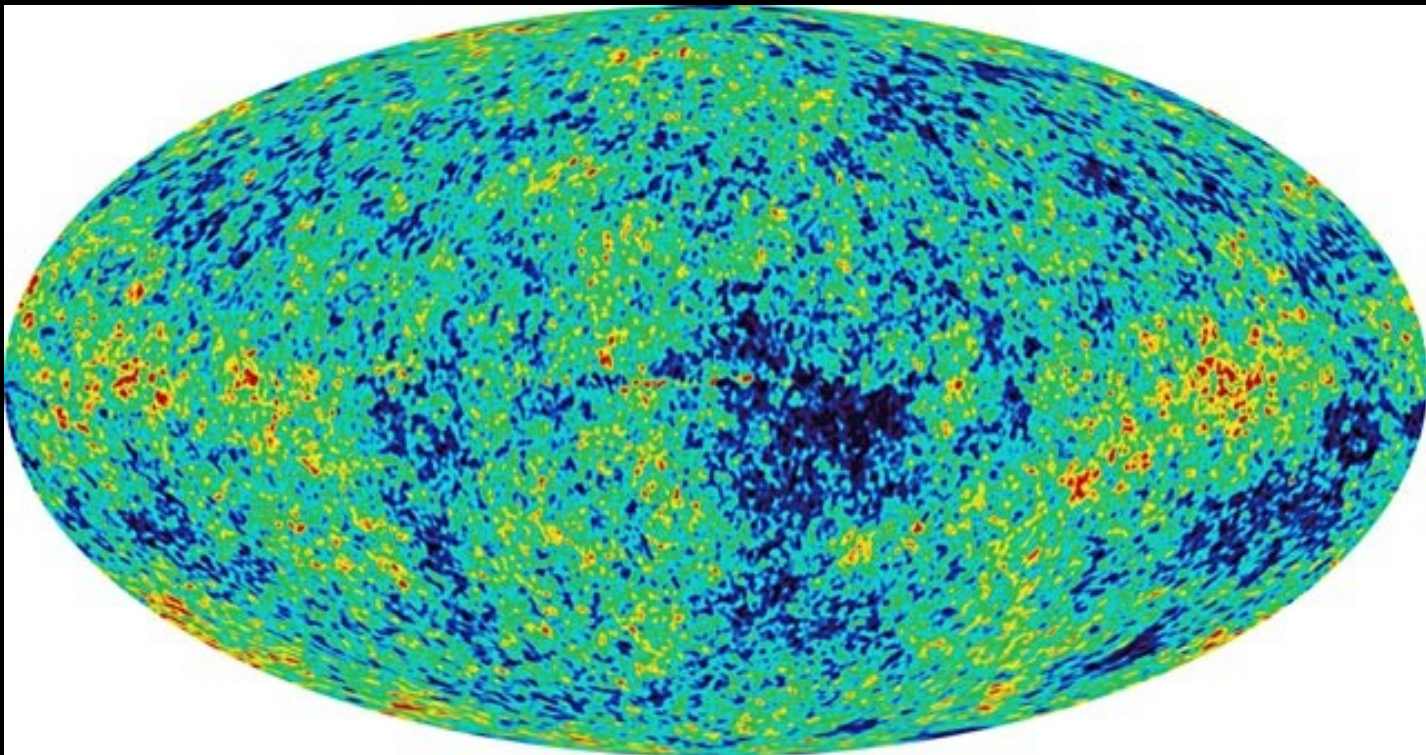


## 5. Qué es la Energía Oscura?

---



Energía Oscura repele la materia y entonces causa la expansión acelerada del universo



Mapa de todo el espacio de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)

---

# Asimetría de Quarks en el Universo primogenio

---



Materia y anti-materia fueron creadas en cantidades iguales en el Big Bang. Pero una pequeña asimetría en sus propiedades dejó...

10,000,000,001  
quarks

10,000,000,000  
antiquarks

Quarks y antiquarks se juntaron...

# Asimetría de Quarks en el Universo primogenio

---



Todos se aniquilaron excepto por  
una pequeña diferencia.

## 6. Porqué el universo solo quedó hecho de materia?

---



Una pequeña asimetría en las propiedades entre materia y anti-materia nos dejó con suficiente materia para formar el presente universo.

Conocemos de un tipo de esas asimetrías en quarks.

Pero no explica el exceso de materia

Nueva Física de quarks podría causar la asimetría.

O la respuesta podría venir del exótico mundo de los **neutrinos**...

---

# Neutrinos

---



Neutrinos son las partículas más extrañas que hemos conocido.

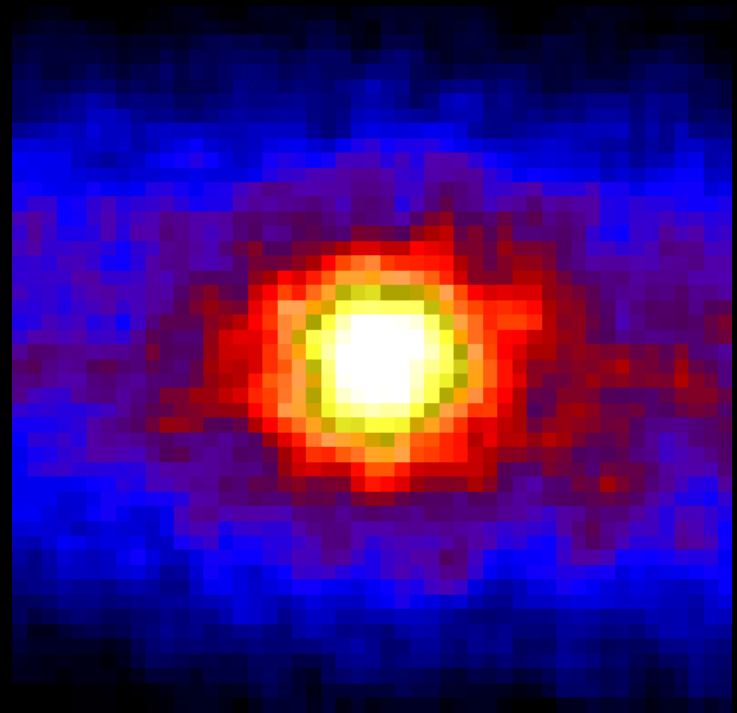
- Son muy pero muy livianas.
- La materia es casi transparente a ellos.

## Neutrinos del Big Bang

10 millones dentro de nosotros

## Neutrinos del Sol

trillones cada segundo

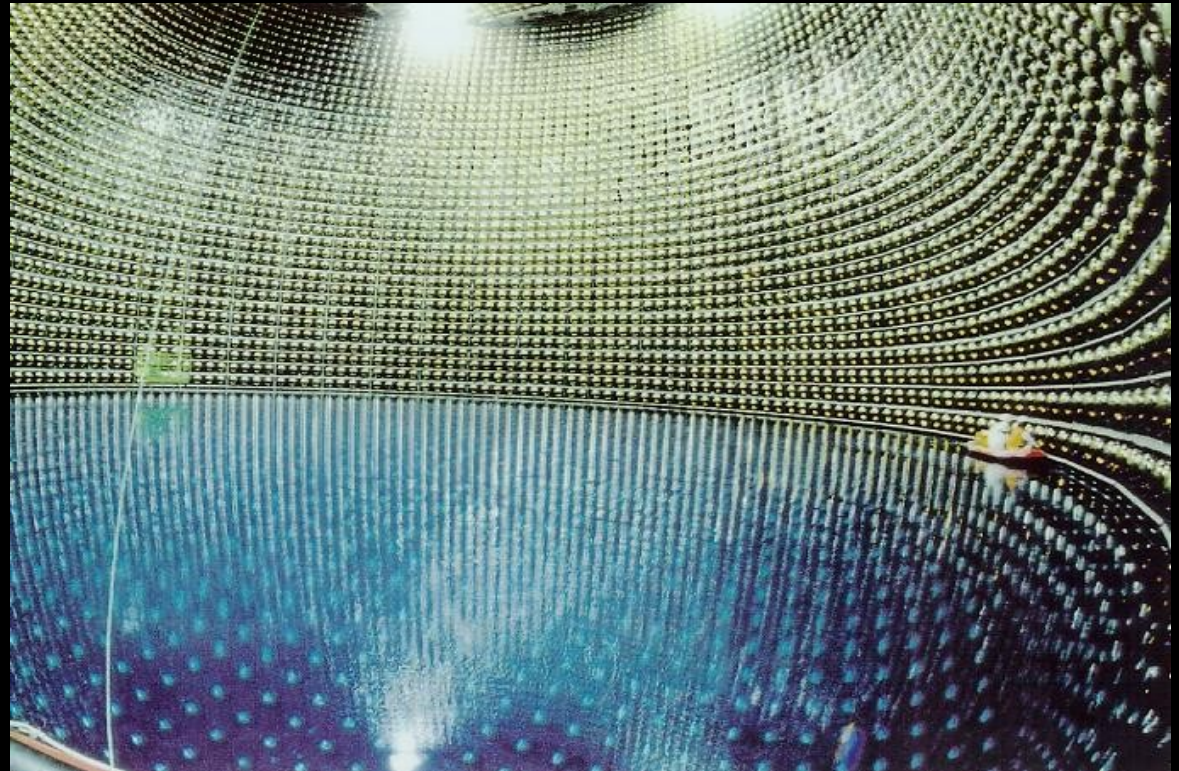


El Sol visto con neutrinos

# Observando neutrinos a nuestro alrededor



Davis y Koshiba,  
Nobel laureados 2002



Super-Kamiokande, detector de neutrinos

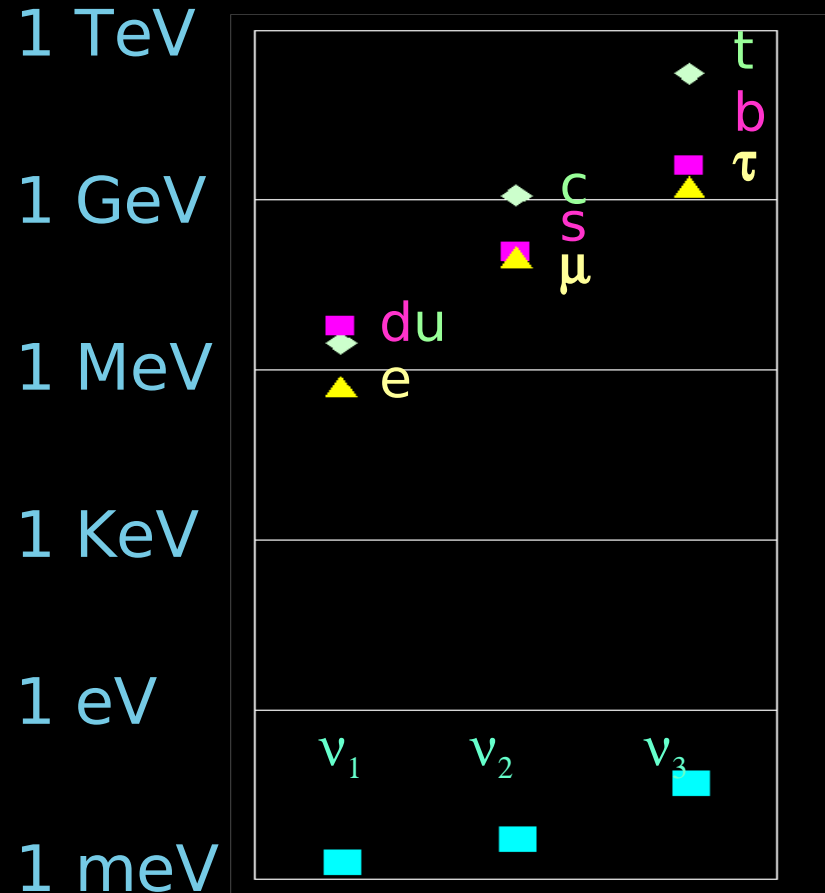
# 7. De dónde viene la masa de los neutrinos?



Por 60 años pensamos que los neutrinos no tenían masa, como el fotón.

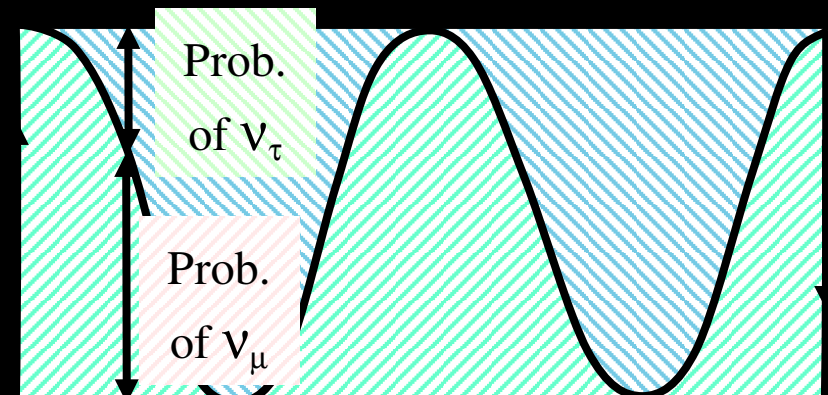
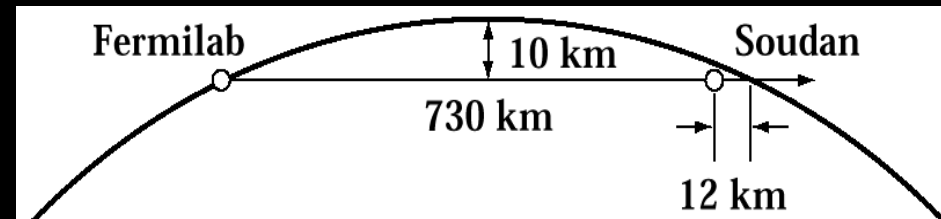
Ahora sabemos que tienen masa.

Pero cómo esa masa puede ser mucho menor que cualquier otra masa?



Masas de quarks y leptons

# Cómo se pesa un neutrino?



Distancia recorrida →



# Porqué la masa de los neutrinos es tan importante?

---



Neutrinos son estrictamente sin masa en el Modelo Estándar. La masa de los neutrinos es el primer signo que nuestra teoría actual está incompleta.

Creemos que los neutrinos tan livianos que vemos podrían haber adquirido su masa de neutrinos muy masivos con masa cerca  $10^{15}$  GeV.

Decaimientos de esos neutrinos pesados en el universo primogenio podrían haber dejado un exceso de materia que nos permitió estar aquí hoy :)

---

# 8. Que causa el misterioso campo de Higgs?



El campo de Higgs aparece para permear el espacio.

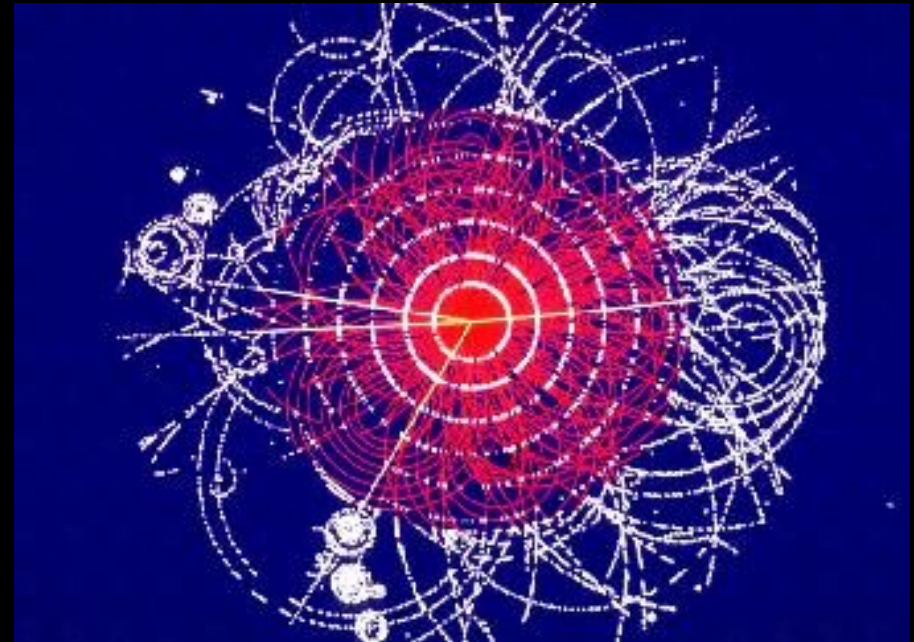
- Conocemos la energía que una partícula adquiere al interactuar con el campo de Higgs como su masa.

El top quark siente el campo de Higgs con mas fuerza.

Hay un campo de Higgs?

Hay dos?

Hay cinco?!



# Las Grandes Preguntas de la Física de Partículas

---



- Porqué la gravedad es tan débil?
2. Existen dimensiones extras de espacio-tiempo?
- Qué es la materia oscura?
  - Es la naturaleza supersimétrica?
  - Qué es la energía oscura?
  - Porqué el universo solo quedó hecho de materia?
7. De donde viene la masa de los neutrinos?
- Qué causa el misterioso campo de Higgs?

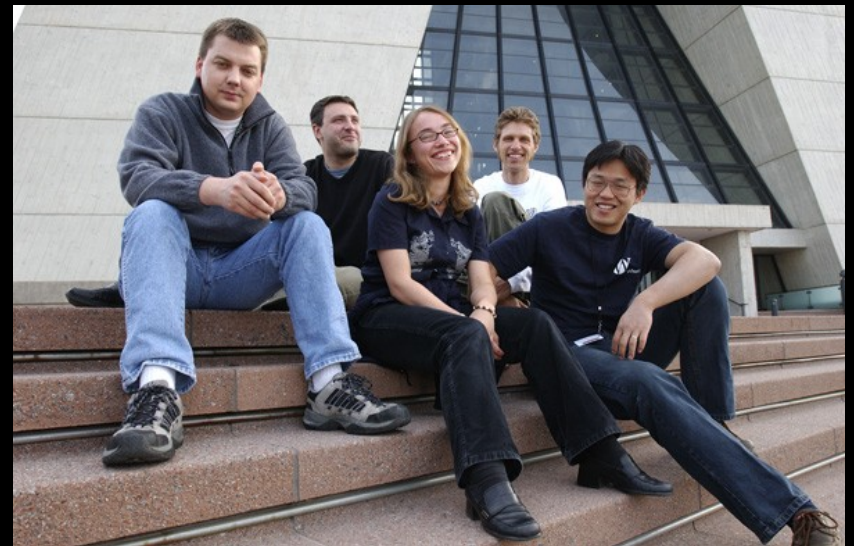
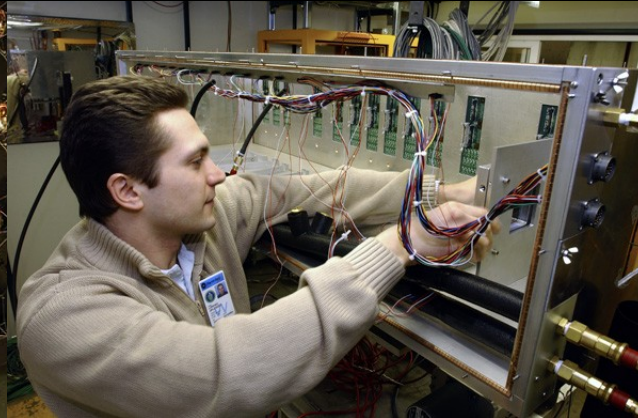
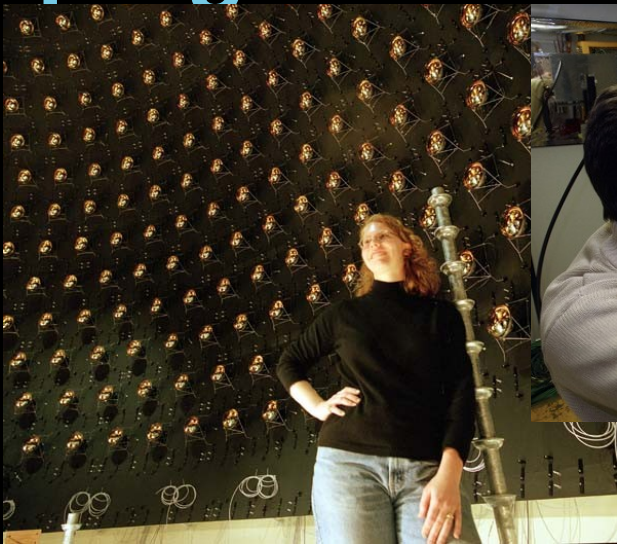


# La respuestas

---

Obtendremos las respuestas a la mayoría de esas preguntas de los experimentos que se están construyendo o que están funcionando ahora.

# Quién respondera esas preguntas?



# Podría necesitarse otra generación de investigadores para entender la Energía Oscura

