

La Materia Oscura en el Universo

Graciela Gelmini - UCLA



ANCEFN, Buenos Aires, 28 de Abril 2023

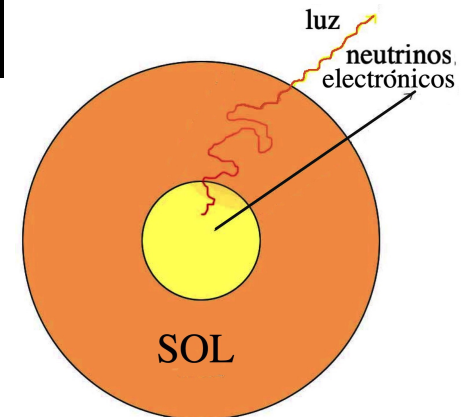
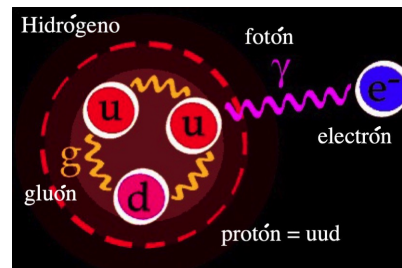
Comienzo de mi trabajo en Física de Astropartículas

Mi tesis (1981) fue en teoría de Partículas Elementales, incluyendo una explicación de la muy pequeña masa de los “neutrinos”. Un neutrino, es como un electrón, pero sin carga eléctrica, con masa mucho menor ($\lesssim 10^{-6}$). Pero en el Modelo Estándar ¡los neutrinos no tienen masa!

El Modelo Estándar (~ 1974) describe toda la física conocida EXCEPTO por gravitación, la Materia Oscura y la masa de los neutrinos.

Modelo estándar de física de partículas

las tres generaciones de la materia (fermiones)			interacciones / transmisores de fuerzas (bosones)		
	I	II	III		
masa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
espin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
CUARKS	u cuark arriba	c cuark encantado	t cuark cima	g gluon	H bosón de Higgs
	d cuark abajo	s cuark extraño	b cuark fondo	γ fotón	
LEPTONES	e electrón	μ muon	τ tauon	Z bosón Z	
	ν_e neutrino electrónico	ν_μ neutrino muónico	ν_τ neutrino tauónico	W bosón W	
				BOSONES DE GAUGE BOSONES VECTORIALES	BOSONES ESCALARES



Neutrinos son muy abundantes: $\sim 10^{11}$ pasan a través de nosotros por cm^2 por segundo

Comienzo de mi trabajo en Física de Astropartículas

En mi tesis propuse un modelo e inventé el nombre “Majoron”, ahora muy difundido, para una nueva partícula que aparece en ese tipo de modelo, asociada con una “masa de Majorana” (tipo de masa propuesta por Ettore Majorana 1906-1938), con la que los neutrinos son su propia antipartícula.

Por este trabajo obtuve una posición de postdoc, en el CERN, donde empecé a trabajar en Astropartículas a través de la cosmología y astrofísica de neutrinos

Los neutrinos son muy importantes en astrofísica y cosmología. Dos ejemplos,

- son las partículas más abundantes en el Universo, $336/\text{cm}^3$, después de los fotones del Fondo Cósmico de Microondas o CMB, $440/\text{cm}^3$ (forman un Fondo Cósmico de Neutrinos o $C\nu B$)
- 99% de la energía emitida en la explosión de una Supernova es en neutrinos.

Los neutrinos contribuyen con $\lesssim 0.1$ a la densidad del Universo, mucho menos que la Materia Oscura, que requiere física mas allá del Modelo Estándar.

¿Qué es la Materia Oscura?

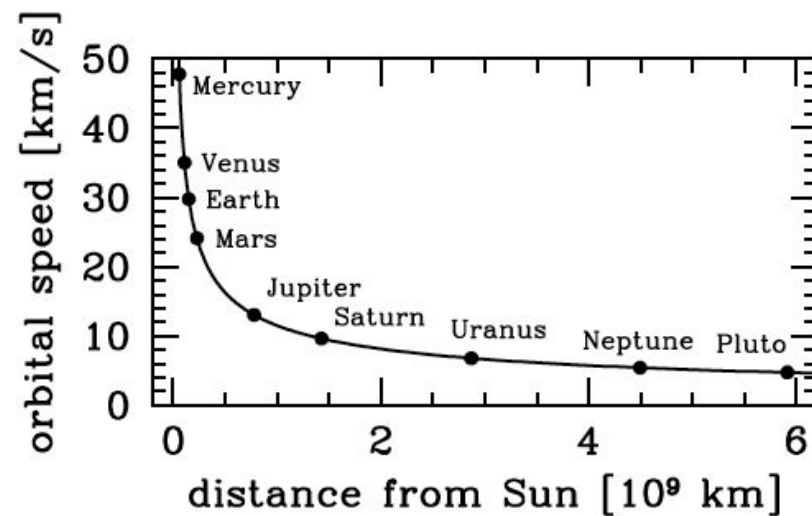
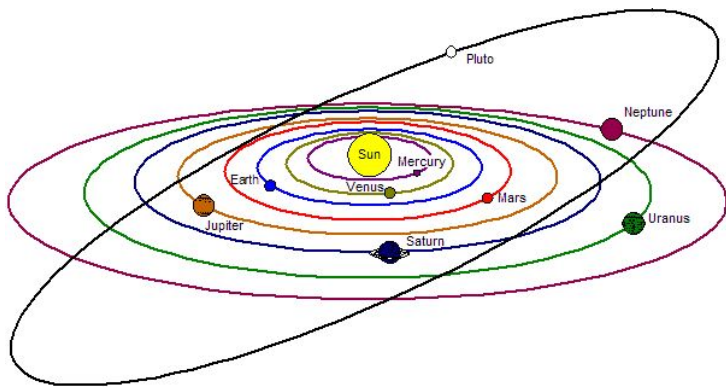
La mayor parte del Universo no es como nuestro entorno

- A nuestro alrededor: átomos y luz, neutrinos, y partículas inestables...
- Pero “pesamos” el Universo y encontramos que ¡la mayoría del Universo no está constituida por nada de esto!

¿Cómo ‘pesamos’ el Universo?...empecemos por el Sol

¿Cuál es la masa del Sol? Usamos la curva de rotación de los planetas

$$\frac{GM_{\odot}m}{r^2} = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}}$$



$$\Rightarrow M_{\odot} = 1.9889 \times 10^{30} \text{ kg}$$

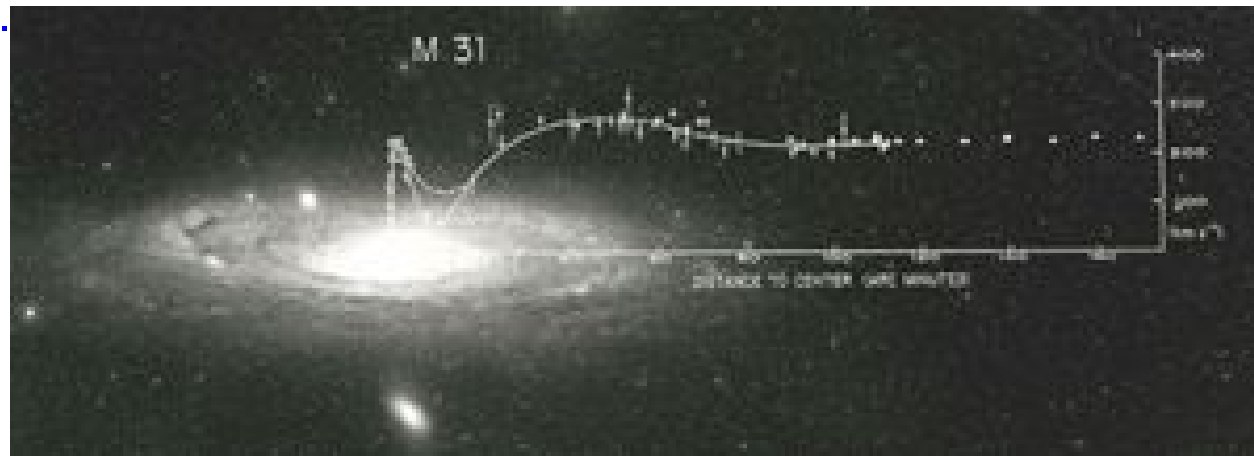
El mismo argumento muestra que...

La Materia Oscura domina en las galaxias:

En los años 1970 Vera Rubin y otros probaron de usar el mismo método en galaxias espirales esperando encontrar $v \sim 1/\sqrt{r}$ a distancias r que superan el radio del disco



Y encontraron..

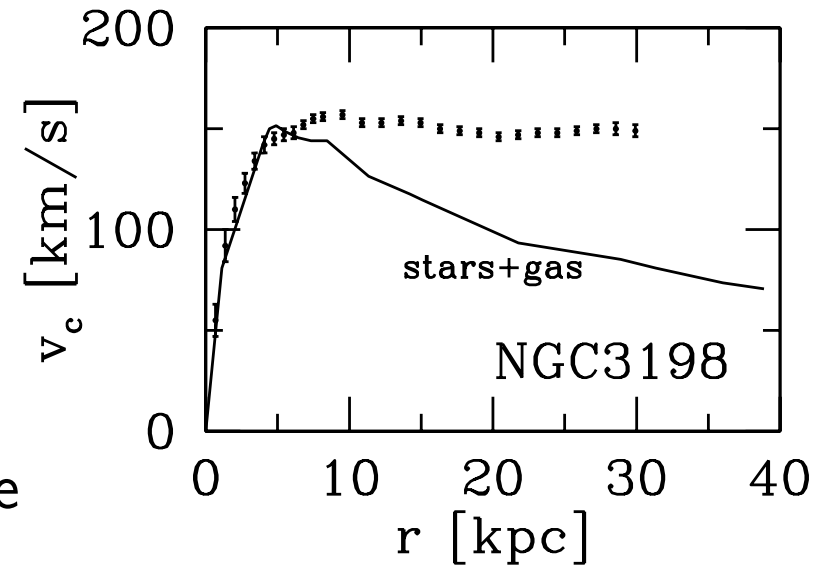


¡que la velocidad de rotación galáctica es constante!

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} = \text{const.}$$

$$\Rightarrow M(r) \sim r$$

¡la masa sigue creciendo con el radio, aún donde no hay luz! O sea, hay materia que no absorbe ni emite luz, Materia Oscura.



La Materia Oscura es dominante en las galaxias

e.g. in NGC3198

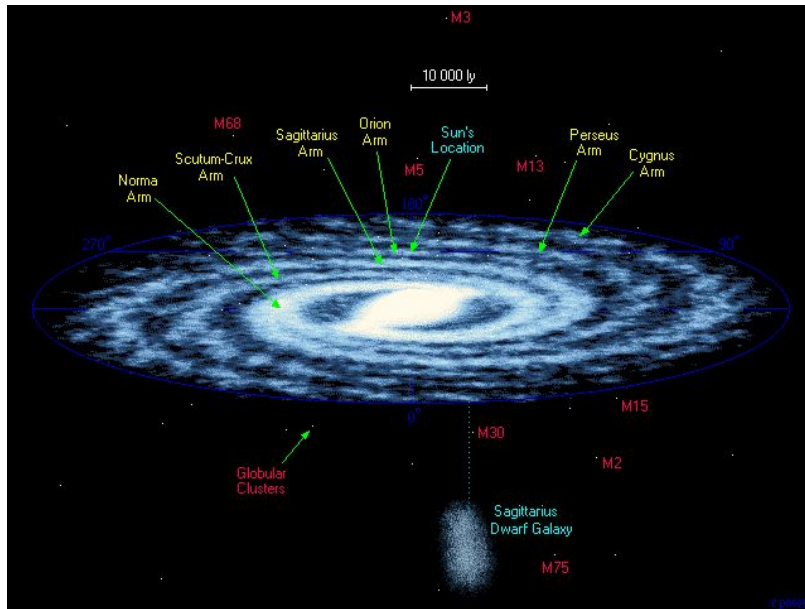
$$M = 1.6 \times 10^{11} M_{\odot} (r/90 \ell y)$$

$$M_{\text{estrellas+gas}} = M_{\text{visible}} = 0.4 \times 10^{11} M_{\odot}$$

$$\frac{M}{M_{\text{visible}}} > 4$$

Halo Oscuro de la Via Láctea (rendición artística)

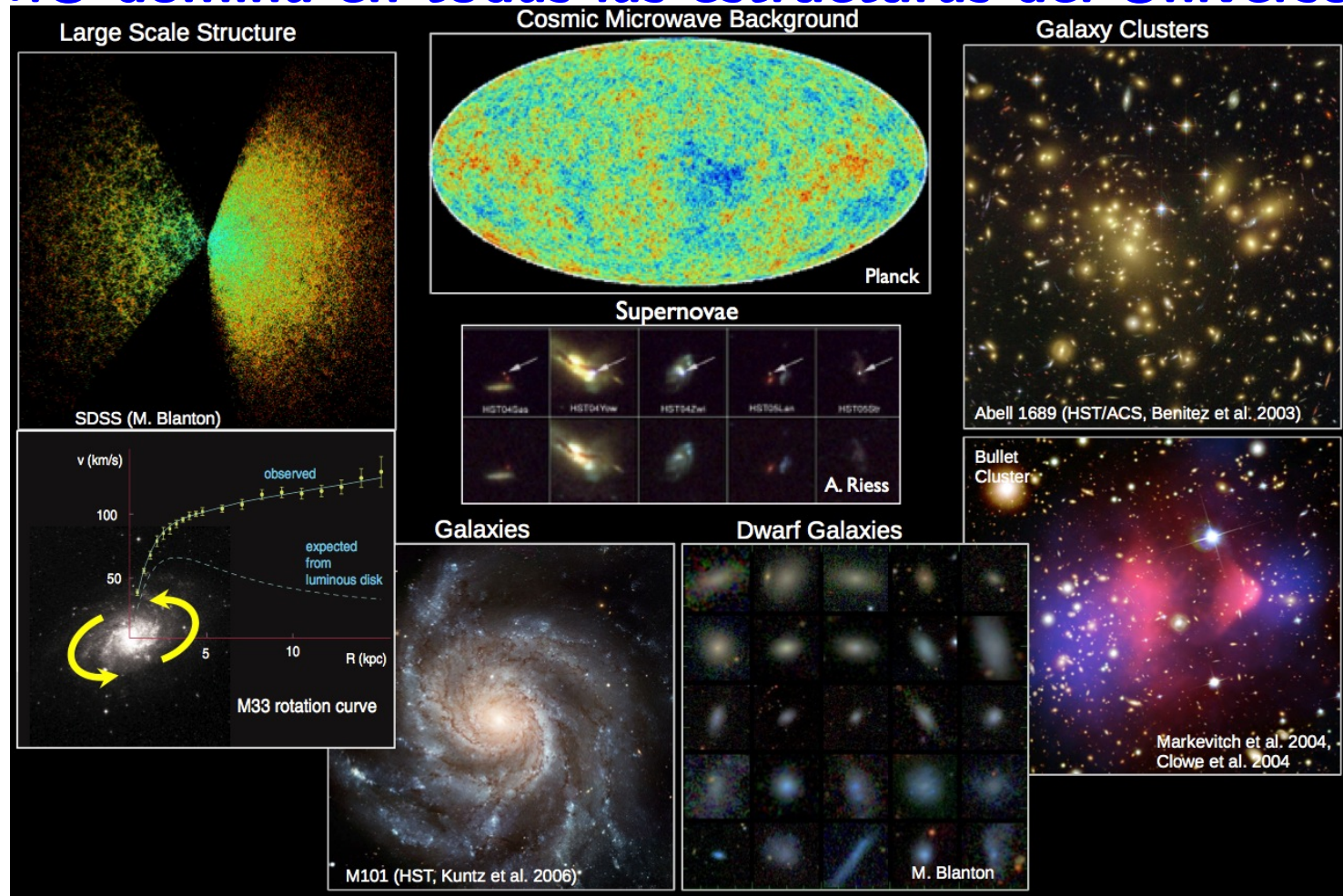
Materia Visible forma un disco y barra central, pero ¡la estructura total es mucho mas grande!



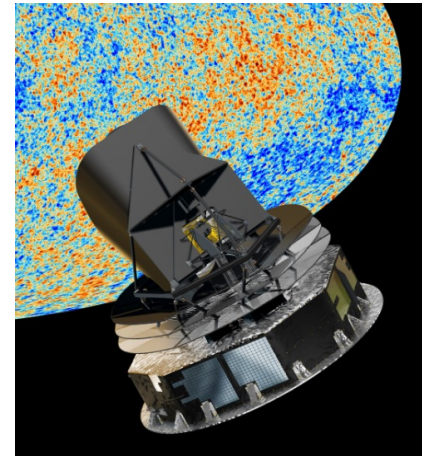
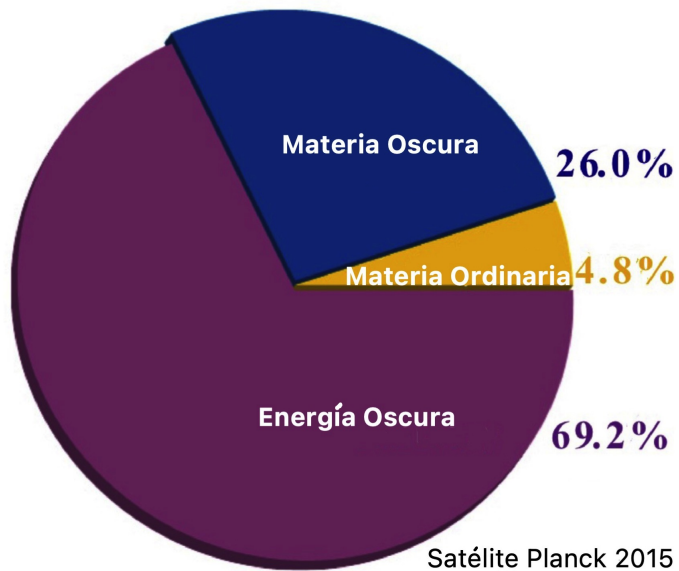
El Halo Oscuro de la Via Láctea contiene mas del $\simeq 80\%$ de la masa de la estructura total.

El Sol se mueve en el Halo Oscuro de nuestra galaxia: hay un “viento” de MO en la Tierra: 10^7 (masa de un protón/ m_{MO}) partículas pasan a travez de nosotros por cm^2 por segundo.

La MO domina en todas las estructuras del Universo



A las escalas más grandes



“Energía Oscura” 69% (con interacción gravitacional repulsiva)

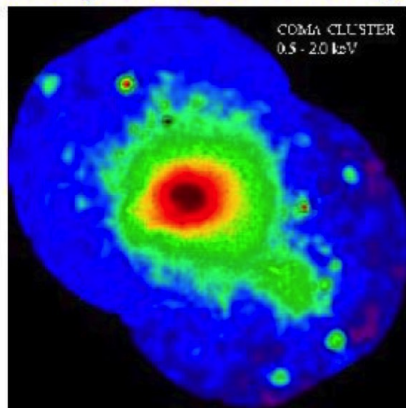
“Materia” 31% (con interacción gravitacional usual- forma estructura ligadas gravitacionalmente) y la mayor parte es **“Materia Oscura” 26%**

“Oscura”: nombre equivocado históricamente motivado (se pensaba en algo que no brillaba). Debería ser “Materia Transparente” ya que no observamos que emita ni absorba luz.

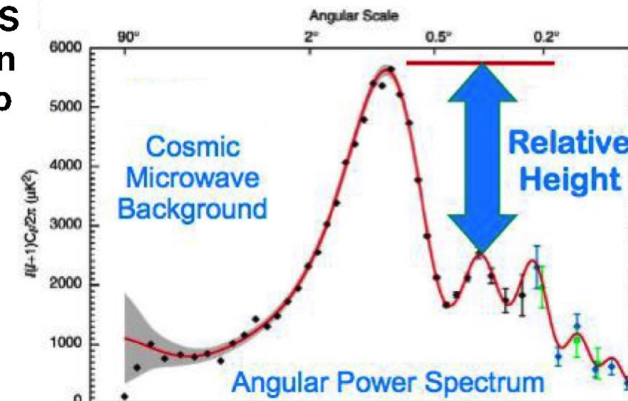
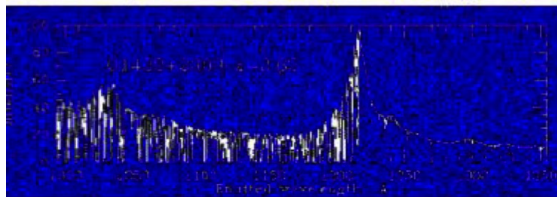
Nuestro tipo de materia es $< 5\%$ Fig. de J. Primack 2010

5 MEDICIONES INDEPENDIENTES
COINCIDEN: átomos constituyen
 $< 5\%$ de la densidad de Universo

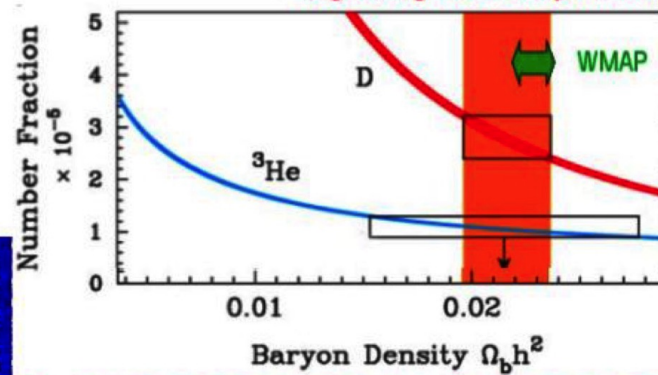
Galaxy Cluster in X-rays



Absorption of Quasar Light



Deuterium Abundance
+ Big Bang Nucleosynthesis



& BAO WIGGLES IN GALAXY P(k)

¿Qué compone la Materia Oscura?

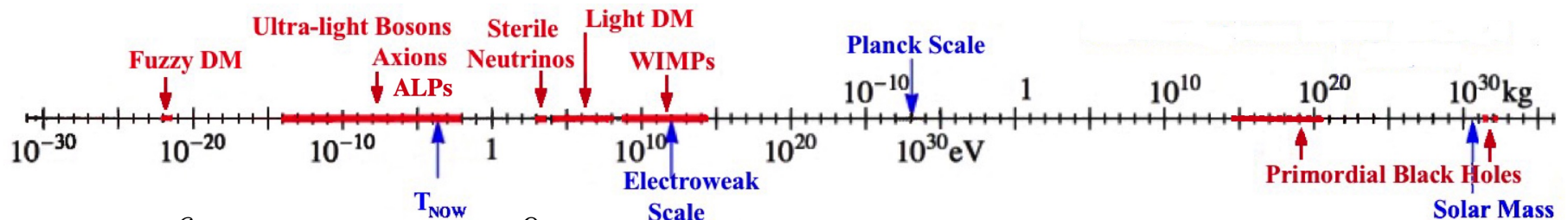
Empecé a trabajar de lleno en MO como postdoc en Harvard (más en un momento)

Mi trabajo se ha centrado en su mayor parte en el estudio de candidatos para constituir la MO, su formación en el Universo primitivo y cómo detectarlos.

¡La masa de los candidatos para la MO varía en 90 órdenes de magnitud!

Límite inferior: "MO Difusa" ("Fuzzy DM"), bosón con longitud de De Broglie de 1 kpc

Límite superior: Agujeros Negros Primordiales (Primordial Black Holes - PBH)



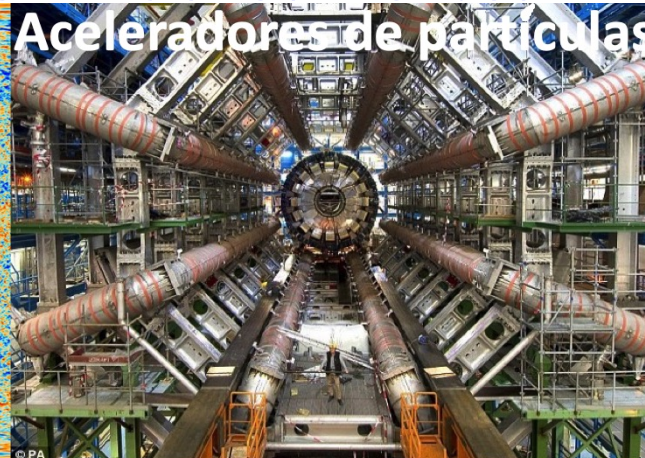
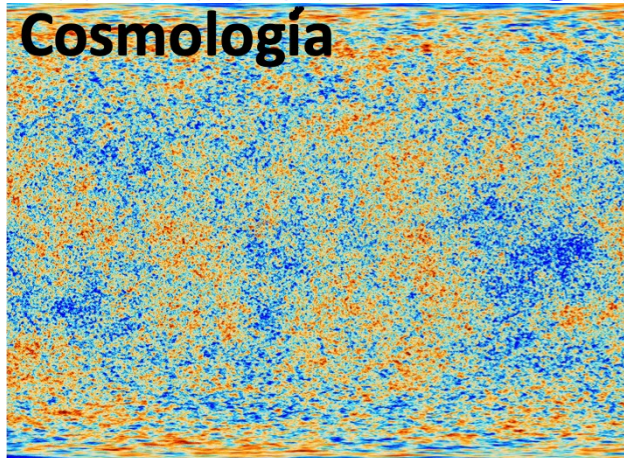
Nombres divertidos: "WIMP" (Weakly Interacting Massive Part.) = "debilucho",

PBHs son "MACHOs" (Macroscopic Astrophysical Compact Halo Objects),

"Axion" por un detergente, "ALPs" (Axion Like Particles)...

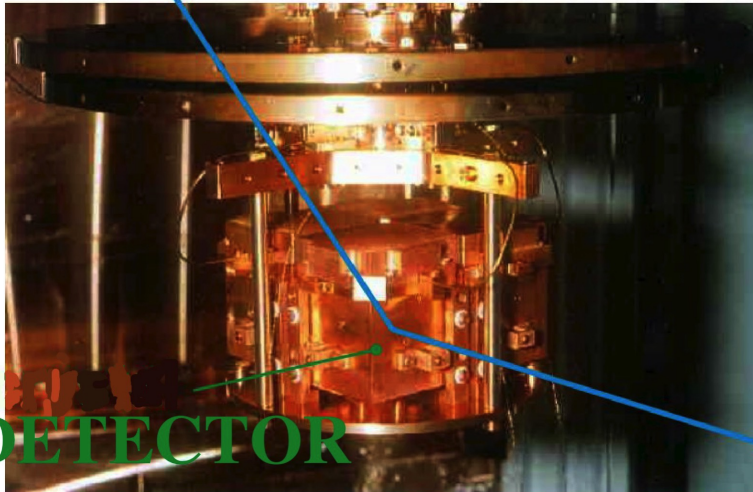


Se intenta elucidar la MO en muchos frentes



Detección Directa de MO intenta detectar la energía depositada dentro de un detector por partículas del Halo Oscuro de nuestra galaxia que pasan a través de él (su velocidad media es la del Sol en la galaxia, 220 km/s)

PARTÍCULA DE MATERIA OSCURA



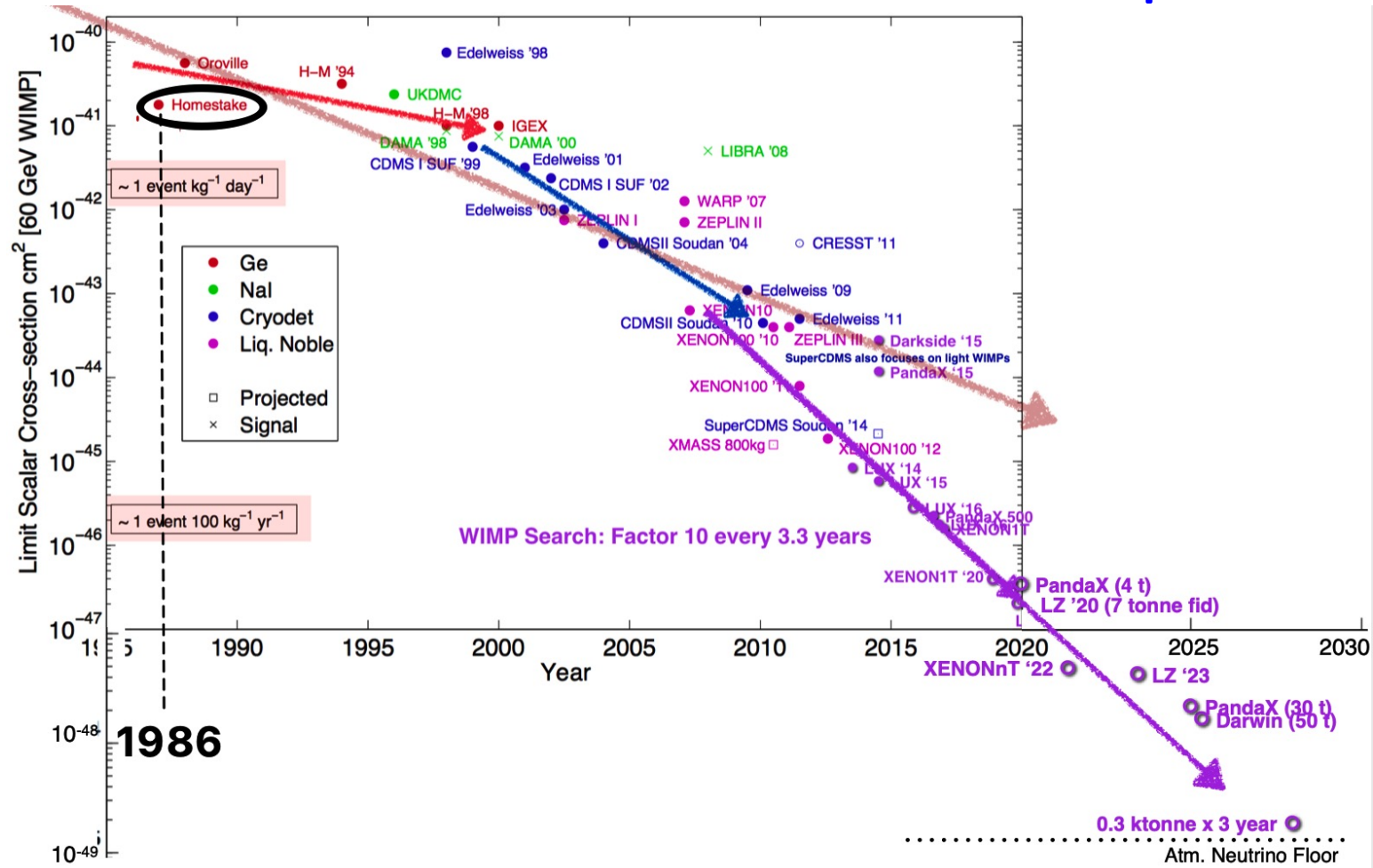
DETECTOR

- La MO podría interactuar con núcleos y/o electrones y ser difractada o absorbida
- Energía depositada y tasa de interacción muy chicas.
- Modulación anual de la tasa de interacción debida a la rotación de la Tierra alrededor del Sol ($< 10\%$): máxima señal en junio, mínima en diciembre

(¡y hay fondos experimentales dependientes de la temperatura, que son máximos en verano!)



La sensibilidad ha incrementado enormemente desde el primer intento



Fui coautora del primer intento de detección directa. Se mostró por primera vez que era posible una detección directa con las técnicas disponibles:

un detector hecho para buscar la desintegración beta doble del Ge, en la Mina Homestake en South Dakota (de Frank Avignone et al.), con un modelo del Halo Oscuro construido por un astrofísico (David Spergel), un modelo calculado de la respuesta en Ge a un retroceso nuclear (por Steve Ahlen) y el modelo de partícula y análisis de datos que hice yo.

Volume 195, number 4

PHYSICS LETTERS B

17 September 1987

**LIMITS ON COLD DARK MATTER CANDIDATES
FROM AN ULTRALOW BACKGROUND GERMANIUM SPECTROMETER**

S.P. AHLEN ^a, F.T. AVIGNONE III ^b, R.L. BRODZINSKI ^c, A.K. DRUKIER ^{d,e}, G. GELMINI ^{f,g,1}
and D.N. SPERGEL ^{d,h}

- ^a Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA
- ^b Department of Physics, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA
- ^c Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA 99352, USA
- ^d Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA 02138, USA
- ^e Applied Research Corp., 8201 Corporate Dr., Landover MD 20785, USA
- ^f Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA
- ^g The Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL 60637, USA
- ^h Institute for Advanced Study, Princeton, NJ 08540, USA

Received 5 May 1987

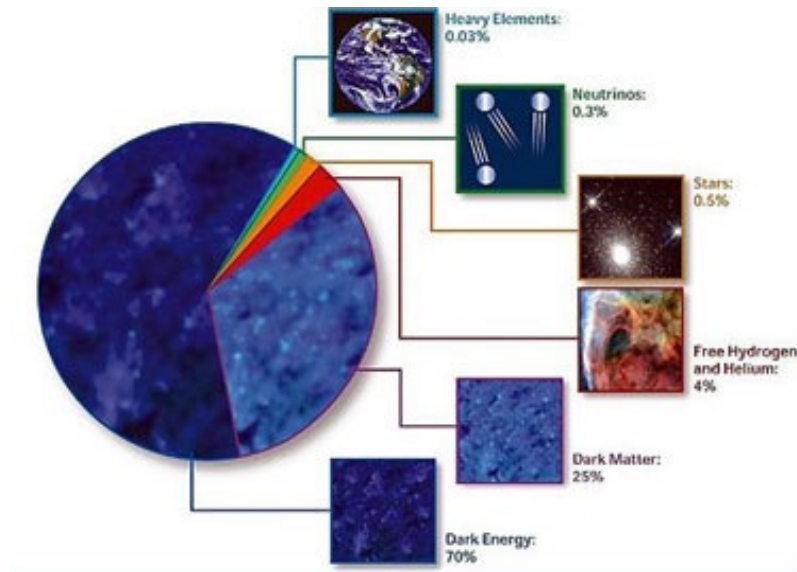
An ultralow background spectrometer is used as a detector of cold dark matter candidates from the halo of our galaxy. Using a realistic model for the galactic halo, large regions of the mass-cross section space are excluded for important halo component particles. In particular, a halo dominated by heavy standard Dirac neutrinos (taken as an example of particles with spin-independent Z^0 exchange interactions) with masses between 20 GeV and 1 TeV is excluded. The local density of heavy standard Dirac neutrinos is $< 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ for masses between 17.5 GeV and 2.5 TeV, at the 68% confidence level.

He estado en la Universidad de California Los Angeles (UCLA) desde 1990, trabajando en una variedad de temas en Física de Astropartículas

- Producción y detección de diversos candidatos para la MO: WIMPs, ALPs, Agujeros Negros Primordiales...
- Candidatos de MO como los primeros mensajeros de la época del Universo primitivo anterior a la nucleosíntesis en el Big Bang, época de la cual no tenemos aún dato alguno,
- física y astrofísica de neutrinos,
- origen y características de los rayos cósmicos de ultra alta energía,
- modelos del período inflacionario del Universo primitivo,
- modelos de generación de la asimetría entre materia y antimateria en el Universo...

Encuentro la Física de Astropartículas tan fascinante como cuando empecé

95% del contenido del Universo es desconocido



- 69% Energía Oscura [con interacción gravitacional repulsiva- se ignora en qué consiste]
- 26% Materia Oscura [nuevas partículas? Agujeros Negros Primordiales?...]
- 5% núcleos/átomos, nuestro tipo de materia [última revolución Copernicana]
- $\simeq 10^{-5}$ radiación de fondo.

¡Tremenda cantidad de trabajo queda por hacer!

Intensa actividad presente a nivel mundial para elucidar la materia oscura y la energía oscura: podríamos completar el Modelo Estándar y ser la primera generación de humanos que sepa qué compone el Universo y por lo tanto cuál será su destino.

