

## Ciclo 2005 De Conferencias Para Todo Público



OBSERVATORIO ASTRONÓMICO  
de CÓRDOBA

**CONFERENCIA  
PARA TODO EL PÚBLICO  
CON ENTRADA LIBRE**

Viernes 4 de Noviembre, 20 hs. Dr. Mario Abadi

**"Formación de  
Galaxias"**

Las Conferencias se  
realizarán los primeros  
viernes de cada mes  
(desde agosto a  
diciembre del 2005)  
en el Auditorio del  
Observatorio  
Astronómico sito en  
Laprida 854  
(Bº Observatorio) Cba.

UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
CÓRDOBA

OBSERVATORIO  
ASTRONÓMICO  
DE CÓRDOBA

**Presentación: Dr. Sebastián Lípari**

**Diserta: Dr. Mario Abadi**

**Fecha: 04 de Noviembre de 2005**

## Presentación

Antes que nada, gracias por su presencia. Nuestro objetivo en el Observatorio es [convocar] a la gente y comentarles lo que estamos haciendo. Con el apoyo de la Dirección, ya casi estamos terminando [de elaborar] el programa [de conferencias] para el año 2006. Estaríamos empezando en abril, con “*Formación y Evolución de Planetas Extra-Solares*”, un tema que varias personas habían pedido y que estaría a cargo del **Doctor Voyé**. Luego, la **Doctora Mercedes Gómez** va a hablar sobre “*Discos Donde se Forman los Planetas*”. Otro tema que también nos han pedido es “*Distintos Tipos de Estrellas*”. Después, el **Doctor Merchand** va a hablar de “*Cosmología y Simulaciones*”. Y el programa completo del Ciclo 2006 va a estar escrito muy pronto (diciembre de 2005).

Hoy estamos reunidos para la conferencia sobre “*Formación de Galaxias*” que nos va a dar el **Doctor Mario Abadi**. Voy a resumir un poco su currículum:

Es uno de los profesores jóvenes del Observatorio, justamente en esta materia, “*Formación de Galaxias*” (está trabajando a nivel internacional con el grupo líder en este tema)...

Ha hecho el (?) en Inglaterra, donde está el grupo tal vez más importante en “*Formación de Galaxias*”. Allí trabajó, sobre todo, en el modelo jerárquico de formación de galaxias (de esto ya nos contó algo Diego García Lambas)...

Trabaja en el grupo con Diego...

Y básicamente –como decíamos- [su aporte a] la docencia, su investigación en este tema trabajando con el grupo líder (...) y sus comunicaciones son realmente importantes en los últimos 3 o 4 años...

Ahora nos va a contar en forma un poco más amena, para el público en general, lo que suele contar en sus clases y en su trabajo sobre “*Formación de galaxias*”.

Es un gusto –repito- contar con la presencia de ustedes. Los invitamos para la conferencia del próximo mes (diciembre), y por supuesto para el **Ciclo 2006**.

## Formación de Galaxias

Creo que la mejor forma de empezar una charla sobre **Formación de Galaxias** es definir lo que es una “Galaxia”. Y el lugar a donde uno primero recurre cuando busca una definición es probablemente el diccionario. Veamos lo que dice la Real Academia Española:

### Definición

- galaxia. (Del lat. galaxias, y este del gr. γαλαξίας, lácteo).
- 1. f. *Astr.* Conjunto de gran tamaño constituido por numerosísimas estrellas, polvo interestelar, gases y partículas.
- 2. f. por antonom. La Vía Láctea.

‘Galaxia’ deriva del latín, y este del griego, y quiere decir ‘lácteo’. Notamos que existe una sonoridad parecida entre ‘galaxia’ y ‘lácteo’. Dice también que es de género femenino; que corresponde al área de astronomía. Dice que es un “*Conjunto de gran tamaño constituido por numerosísimas estrellas, polvo interestelar, gases y partículas*”.

Agrega que es, por antonomasia, la Vía Láctea. ‘Antonomasia’ es llamar a las cosas por el nombre (o el nombre por las cosas, digamos). Cuando nosotros decimos “las galaxias” muchas veces nos referimos a la Vía Láctea. Es lo mismo que cuando decimos “gillette” y nos estamos refiriendo a las hojas de afeitar.

Esta definición (sobre todo la primera que mencionamos) es una definición moderna si se quiere, ya que haber arribado a esta definición no fue una tarea científica sencilla. Diría que es una definición que debe tener unos pocos cientos de años, lo que es moderno en escala astronómica.

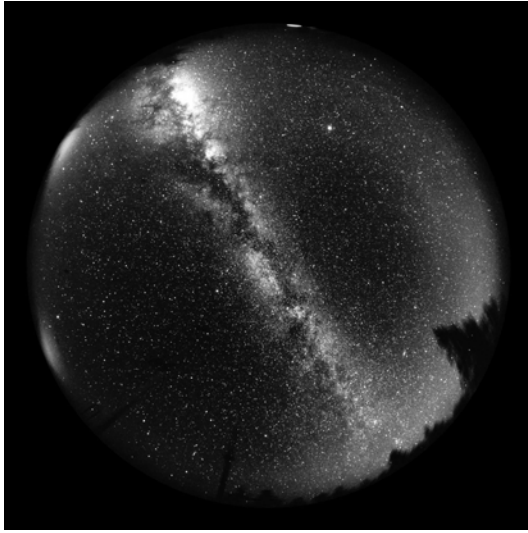
Digo esto porque el hecho fundamental se basa en que es muy difícil darse cuenta de lo que es una galaxia si uno no posee tecnología para observarlas. Y digo ‘tecnología’ cuando pienso en telescopios, espectrógrafos, cámaras fotográficas... para analizar la luz que nos llega de las galaxias.

Si pensamos en lo que es posible observar a simple vista, del total de galaxias visibles en el universo, que son unos 100.000 millones, sólo una pequeña fracción de ellas son observables a simple vista, solamente cuatro:

## Galaxias Visibles sin Telescopio

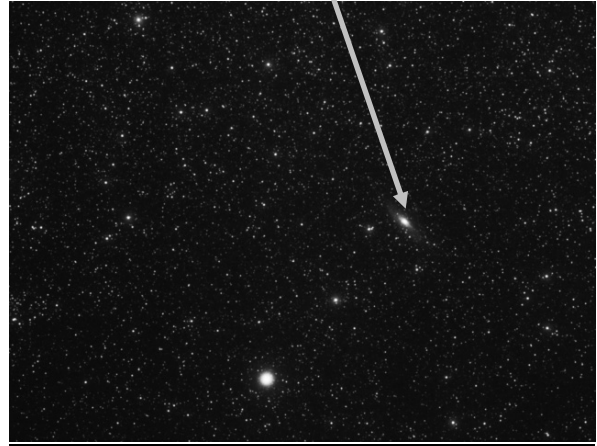
### Vía Láctea (1)

Banda brillante de luz difusa en el cielo nocturno visible a simple vista



### Andrómeda (2)

Nebulosa de tamaño aparente 4 grados



### Composición fotográfica (3)

(Galaxia satélite de Andrómeda)



### Nubes Mayor y Menor de Magallanes (4)

Tamaño aparente:  
3 y 2 grados respectivamente



Por supuesto, la más conocida es la **Vía Láctea (1)**. Si uno pudiera hacerse una idea de cómo es la Vía Láctea cuando uno la observa a simple vista, esto es lo que uno vería, una imagen de la bóveda celeste, una banda brillante de luz difusa en el cielo nocturno visible a simple vista.

Lo que uno puede ver a simple vista no es quizás de un nivel de resolución tan espectacular como esta imagen, pero de todos modos es asombroso ver a la Vía Láctea a simple vista, no desde la ciudad, sino en un cielo no contaminado como por las luces artificiales.

La otra galaxia que uno puede ver a simple vista es **Andrómeda (2)**. Esta es una galaxia vecina, la más próxima a nosotros. A simple vista se puede observar como una pequeña nebulosa difusa, de un tamaño angular de unos 4 grados. Para que se den cuenta lo que quiere decir 4 grados, les muestro esta **composición fotográfica (3)**, que no es una fotografía de verdad, sino una composición del tamaño relativo de lo que es **Andrómeda (2)** respecto de la luna. Recuerden que la luna siempre nos llama la atención por el gran tamaño que tiene en el cielo. Es decir que Andrómeda es un objeto varias veces más extendido que el tamaño de la luna.

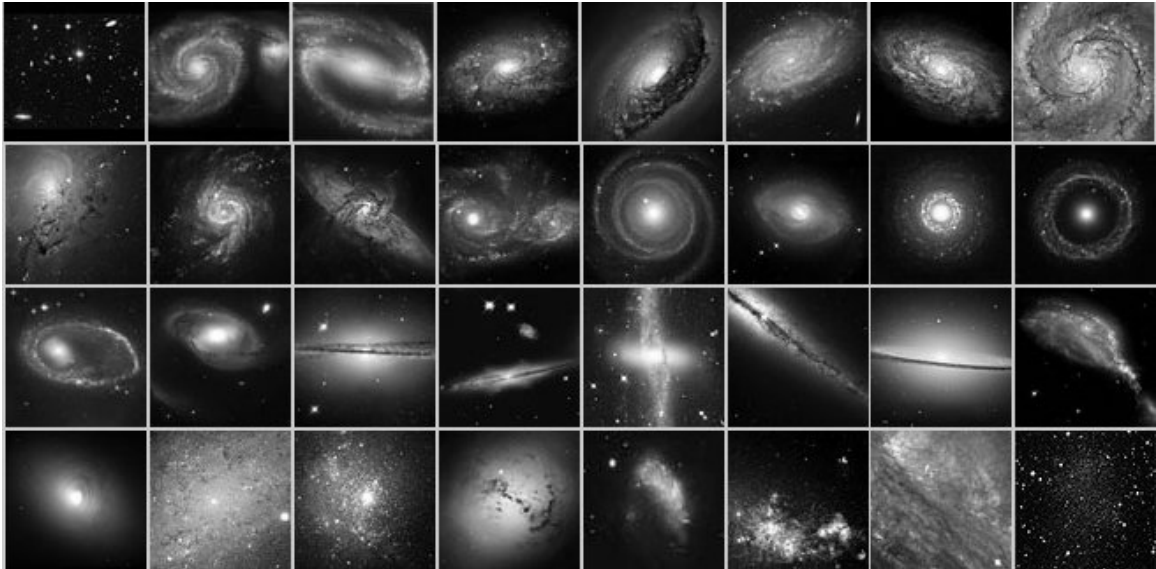
Además, pueden observar que hay una pequeña galaxia satélite de Andrómeda (esta no es visible a simple vista, pero la podemos ver en la fotografía).

Las siguientes dos galaxias que se pueden ver a simple vista son **la Nube Mayor y la Nube Menor de Magallanes (4)**, que son de tamaño comparable a Andrómeda, pero en rigor a la verdad no son galaxias normales, sino que son galaxias satélites; pero no son satélites de Andrómeda, sino de nuestra Vía Láctea.

La Vía Láctea tiene 11 galaxias satélites, al menos esas son las que hemos descubierto hasta ahora. Estas galaxias orbitan alrededor de la Vía Láctea del mismo modo que la luna orbita alrededor de la Tierra.

Esta visión que uno tiene sin telescopio, contrasta con las extraordinarias imágenes que uno puede haber observado utilizando el telescopio espacial, que es una de las más altas tecnologías que hay en este momento para tomar imágenes. A continuación vemos un muestrario, un 'zoológico' de galaxias que presenta una gran diversidad morfológica: patrones en espiral; barras; hay dos galaxias superpuestas por proyecciones del cielo, pero que no están verdaderamente una cerca de la otra; hay pares de galaxias que interactúan, galaxias con anillos; galaxias con bandas de polvo... Es decir que existe una variedad morfológica asombrosa cuando uno mira las galaxias:

## Galaxias Visibles con el Telescopio Espacial



Si uno se queda con la imagen de las galaxias a simple vista, puede tratar de imaginarse cuáles fueron los primeros modelos que la gente pensó respecto a cómo se habían formado estos sistemas, esta enorme banda de luz brillante que se ve en el cielo a simple vista. Aunque no tenían claro que era, observaban una banda brillante en el cielo y comenzaron a hacer lo que uno llamaría:

### “Primeros Modelos de Formación de la Vía Láctea”

*Primeros Modelos de Formación de la Vía Láctea*



**Mesopotamia asiática:** humo de los sacrificios a los dioses

**Egipto:** semillas de las espigas de cereales que la arrojó la diosa Isis

**Grecia:** gotas de leche que brotaron de los senos de la diosa Hera

El primero, o uno de los primeros, es el que pensaron los antiguos en la Mesopotamia asiática, que postulaban que esa banda brillante en el cielo era el

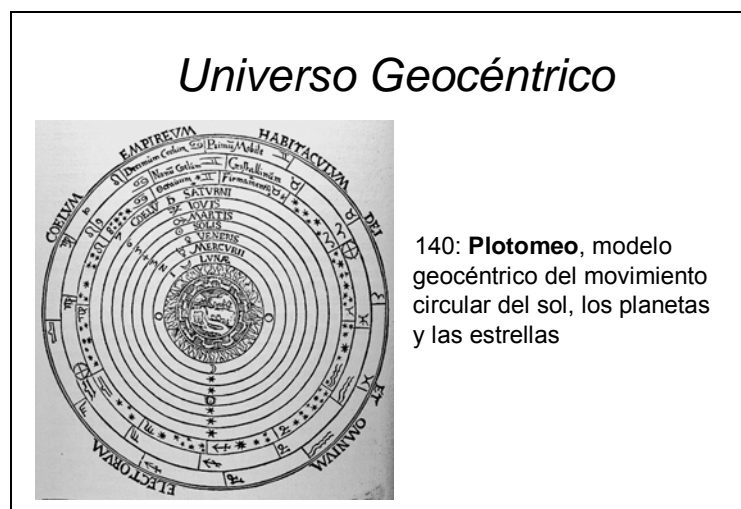
humo de los sacrificios a los dioses; esto, como teoría científica no sería aceptado.

Luego los egipcios postularon que la Vía Láctea se había formado con las semillas de las espigas de cereales que arrojó la diosa Isis cuando era perseguida por el monstruo Tifón.

Los griegos pensaron algo más elaborado. Postularon que la Vía Láctea se había formado por las gotas de leche que brotaron de los senos de la diosa Hera (de ahí el origen de la palabra ‘galaxia’), cuando Hera estaba amamantando a Hércules y se dio cuenta que Hércules no era hijo de ella, sino que era hijo de Zeus (su marido), con otra mujer.

Estos modelos, aunque carecen de valor científico hoy en día, dan cuenta del grado de interés que ha tenido desde tiempos muy remotos este problema. Sin embargo, a pesar de haber sido un problema planteado desde tiempos bastante remotos, no hubo grandes progresos [en la antigüedad]. En la astronomía antigua, el gran interés pasaba más por los planetas. Si observamos las estrellas y la Vía Láctea, notamos que prácticamente todas las estrellas que observamos, o las que observamos a simple vista, son estrellas que pertenecen a nuestra galaxia... Salvo las que provienen de [Andrómeda y Nubes Mayor y Menor de Magallanes; pero es imposible darse cuenta a simple vista, ya que las galaxias están formadas por conjuntos de miles millones de estrellas]

Los primeros avances en los modelos [que buscaban explicar] qué eran estas estrellas son, en la época actual, es decir después de Cristo, los de **Ptolomeo**. En el año 140 el modelo que estaba de moda era el que impuso **Ptolomeo**, un astrónomo basado en las ideas de **Aristóteles** y **Platón**. Este modelo planteaba un Universo Geocéntrico, es decir la Tierra como centro del universo:



Según este modelo, los planetas daban vueltas en órbitas circulares alrededor de la Tierra y las estrellas hacían exactamente lo mismo. La Vía

Láctea era un montón de estrellas que estaban fijas en una esfera y esa esfera giraba alrededor de la Tierra.

Esto no concitaba ningún tipo de controversia. Pero lo que era muy difícil explicar en esta época era el movimiento de los planetas. Los planetas no hacen órbitas simples, sino que se mueven a través de las estrellas en órbitas complicadas; incluso algunas veces retroceden en su movimiento. Por eso generaron todos estos modelos de los epiciclos, que hacían que los planetas giraran en órbitas circulares alrededor de la Tierra y, a su vez, había otras órbitas circulares. Estos modelos eran muy buenos en predecir la (i) de los planetas, pero nunca tuvieron verdaderamente éxito debido a su complejidad.

El tema estuvo bastante parado hasta que vinieron los que hoy uno llamaría “Los 5 fantásticos”:

### Los Cinco Fantásticos



- 1542: **Copérnico**, el Sol como centro del universo
- 1575: **Tycho Brahe**, observaciones de los planetas
- 1609: **Kepler**, los planetas tienen movimientos elípticos alrededor del Sol
- 1610: **Galileo**, inventa el primer telescopio astronómico y distingue innumerables estrellas en la Vía Láctea
- 1679: **Newton**, ley de gravitación universal

En 100 años, cinco personas revolucionaron el modelo de la cosmología. Primero **Copérnico** dijo: ‘Este modelo no funciona, y el centro del universo no es la Tierra, sino el sol’. Copérnico, solito con sus ideas, sin ningún instrumento, movió verdaderamente al universo; lo agarró, lo sacó de donde estaba; sacó la Tierra del centro y puso en el centro al sol.

Después, **Tycho Brahe**, un excéntrico astrónomo danés, quien tenía – según se dice- una nariz de oro y plata, se puso un observatorio y durante 25 años desarrolló observaciones de excelentísima calidad sobre el movimiento de los planetas.

**Kepler** heredó esos datos, estudió el movimiento de los planetas y dijo: ‘Lo que pasa aquí es que los planetas no se mueven en órbitas circulares, sino en órbitas elípticas alrededor del sol’.

Y luego vino **Galileo**. Según dice el mito: nunca es totalmente claro si es **Galileo** quien inventó el primer telescopio, ni siquiera el primer telescopio astronómico. Pero la gran contribución de **Galileo** fue cuando con su telescopio vio, por ejemplo, que Júpiter tenía lunas, es decir satélites que giraban a su alrededor. Y con esto le dio la estocada final al modelo geocéntrico; porque si había cosas que giraban alrededor de otros planetas, la Tierra no tenía por qué ocupar ese lugar privilegiado.

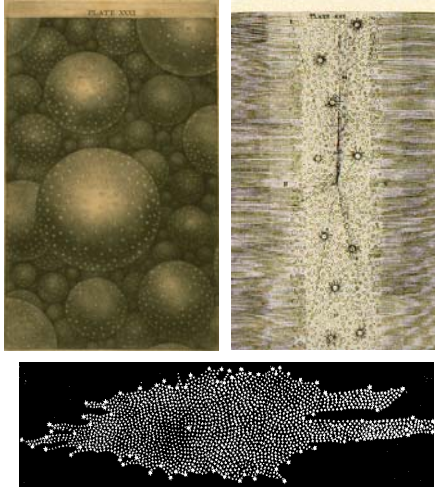
Otra contribución de **Galileo**, que no siempre es mencionada, es que, observando la Vía Láctea, por primera vez se da cuenta que esa banda luminosa que ocupa el cielo está compuesta de miles de millones de estrellas que el alcanza a distinguir con su telescopio.

Por último viene **Newton**, que postula y explica en forma física por qué el movimiento de los planetas es como es.

Las galaxias tuvieron que esperar a que estos problemas estuvieran resueltos para que la gente se empezara a ocupar. Recién con los primeros usos de los telescopios fue posible darse cuenta que existían otras nebulosas en el cielo, que eran parecidas a Andrómeda pero no se sabía qué eran; hasta ese momento eran nubes brillantes en el cielo; no se sabía de qué estaban hechas, etc.

### Luego surgen otros modelos:

### *Modelos de la Vía Láctea*



The image shows three historical models of the Milky Way. The top left is a painting of a shell-like structure with a central core, labeled 'PLATE XII'. The top right is a painting of a flat, disk-like structure with a central core, labeled 'PLATE XII'. The bottom is a diagram of a star count model showing a dense, irregular distribution of stars.

- 1750: **Thomas Wright**, conjunto de estrellas entre dos esferas
- 1755: **Immanuel Kant**, disco de estrellas rotando alrededor de su centro. Otras nebulosas son galaxias distantes (universos islas).
- 1785: **William & Caroline Herschel**, conteo de estrellas, galaxia aplanada con el sol en el centro

**Thomas Wright** nos trae un avance, cuando empieza a postular algunos modelos. Dice que las galaxias, o mejor dicho la Vía Láctea, son montones de estrellas que están contenidas entre dos cáscaras. Por eso, si uno está adentro de la cáscara, cuando mira hacia los costados ve zonas de mayor densidad de

estrellas; en cambio, cuando mira a regiones perpendiculares a la cáscara, es decir hacia arriba, ve menos densidad de estrellas, algo que se corresponde aproximadamente con lo que uno observa cuando ve la Vía Láctea en el cielo.

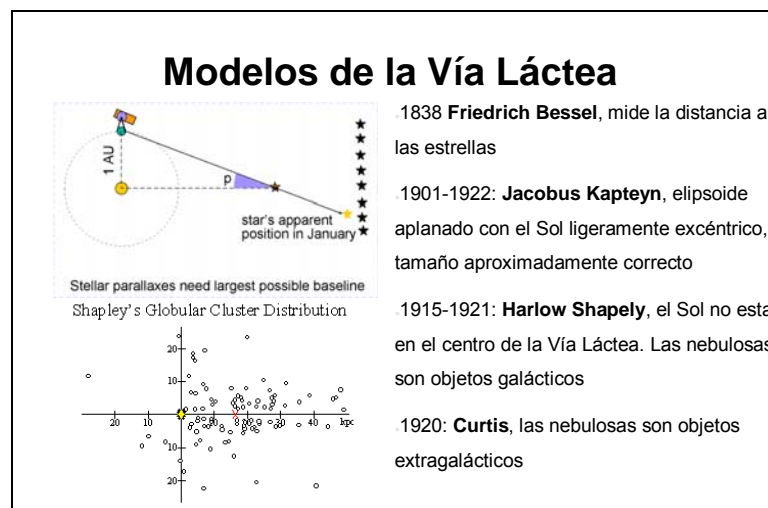
**Immanuel Kant**, aquel filósofo a quien probablemente la mayoría de nosotros conocemos, sin ser un astrónomo postula que las galaxias, esas nebulosas, son discos de estrellas en rotación alrededor de un centro. Dice eso de la Vía Láctea, y dice que las otras nebulosas son exactamente lo mismo, galaxias distantes, lo que hoy conocemos como ‘Universo Islas’. Es asombroso el grado de lucidez de **Kant**, al predecir teóricamente que es lo que se observaba. No usó nunca un telescopio; no le interesaban las observaciones; pero sin embargo dio un modelo extremadamente correcto.

Después vinieron **William y Caroline Herschel**, que empezaron a contar estrellas tratando de hacer un mapa de cómo era la distribución de estrellas en el espacio...

Si uno mira las estrellas y postula que todas tienen el mismo brillo, puede imaginarse y decir: ‘*Las que veo más brillantes es porque están más cerca; las menos brillantes están más lejos*’; esto –repito- asumiendo que todas tienen el mismo brillo.

Y basados en esa idea, los **Herschel** construyeron mapas, y pusieron al sol en el centro de una distribución de estrellas más o menos aplanada.

### La historia continuó:



**Friedrich Bessel** fue el primero que se puso a medir distancias. Es muy difícil en astronomía. Nosotros tenemos algunos bocetos, pero estimar a qué distancia se encuentran las estrellas es un problema crítico. Vemos todo proyectado en el cielo; pero no tenemos esa sensación de profundidad.

Utilizando lo que conocemos como ‘método de paralaje’, si asumimos que el sol está en el centro y la Tierra está dando vueltas, y apuntamos un telescopio a una estrella no muy lejana, [notamos que] la posición aparente de esa estrella

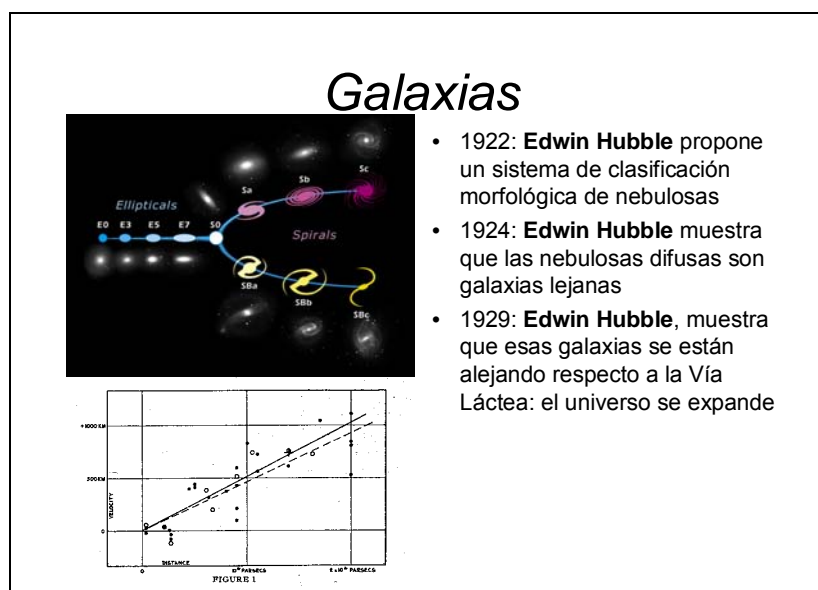
en el cielo se mueve en el cielo respecto de las estrellas más lejanas; esto se debe a las diferentes perspectivas que uno tiene a medida que va dando vueltas la Tierra alrededor del sol.

Con esta información, **Jacobus Kapteyn** postula que la Vía Láctea es un elipsoide aplanado, con el sol no en el centro sino ligeramente corrido. Y aunque ese modelo no es correcto –lo sabemos- nos da el tamaño aproximado de la galaxia.

**Harlow Shapely** postula, [observando] la distribución de algunos objetos que conocemos como ‘cúmulos globulares’, veía que estos estaban todos expuestos hacia una región, y no estaban igualmente distribuidos cuando miraba en direcciones opuestas en el cielo. Pero eso le hizo pensar que [en realidad] los cúmulos globulares no están dispuestos asimétricamente, sino que el centro de la galaxia es esa región, y no el sol. **Y Shapely [calcula] más o menos la distancia correcta del sol a la Vía Láctea.** Finalmente, **Shapely** postula que las nebulosas son objetos que pertenecen a nuestra galaxia.

**Curtis**, en el 1920, postula correctamente que las nebulosas son objetos que están fuera de nuestra galaxia.

## La era moderna



**Hubble** es quien da inicio a lo que podemos llamar la ‘Era Moderna’, cuando en pocos años escribe 4 o 5 artículos de investigación, que constituyen la base científica para quienes hoy investigamos las galaxias.

Dice primero que a las galaxias hay que clasificarlas respecto a la forma que tienen. Propone un sistema de clasificación que las divide en dos tipos: elípticas y espirales. Las clasifica aún sin estar seguro de qué eran estos objetos. Describe a las elípticas como aquellas galaxias que tienen una forma esférica o ligeramente aplanada; y a las espirales como aquellas que son mucho más

achatadas y muestran estructuras en forma de espiral. Además propone que una gran mayoría de ellas posee barras. Los brazos espirales de estas galaxias no parten de la zona central brillante, sino de una barra que está en el centro.

Otra contribución importantísima de **Hubble**, fue mostrar que estas nebulosas son verdaderamente objetos extra galácticos. Él podía estimar las distancias a las estrellas; y con las distancias pudo estimar las velocidades de las galaxias, y se dio cuenta que las galaxias más cercanas se mueven a menor velocidad y las más lejanas se mueven más rápido.

Eso es perfectamente entendible en el marco de una hipótesis de que las galaxias se están expandiendo. Si **Copérnico** solo fue el que movió el universo y sacó a la Tierra de su centro para poner allí al sol, la revolución que trajo **Hubble** fue quizás más importante: no sólo movió al universo, sino que además lo puso en expansión. Esa fue una idea que en ese momento tuvo reticencia, aún de los más importantes científicos físicos que existían. La física tuvo su época de esplendor a principios de este siglo, y fueron algunos de esos científicos los que tuvieron que caer ante la evidencia de que el universo estaba en expansión.

Paso a dar una idea de cuáles son las escalas en astronomía. Una cosa que en general le da un poco de miedo a la gente cuando hablamos son los números grandes con que tratamos. Les recomiendo que todo lo piensen en miles de millones.

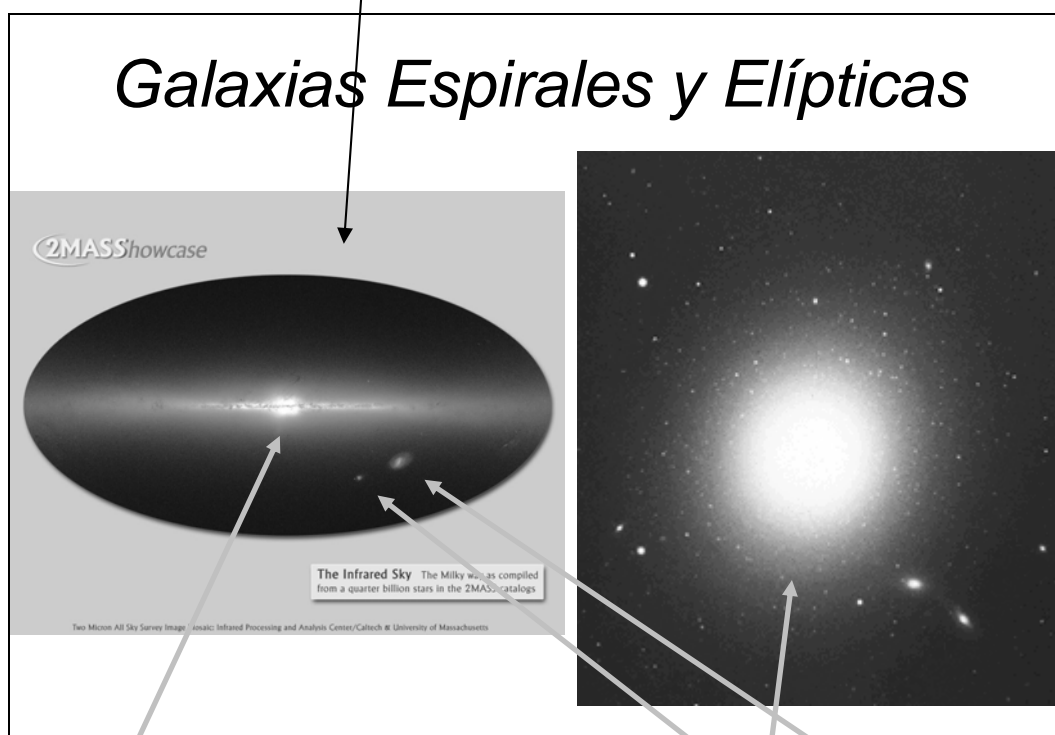
<i>Escalas Astronómicas</i>	
Tamaño de una galaxia	6 mil millones UA
Edad del Universo	14 mil millones Años
Estrellas en una galaxia	100 mil millones
Galaxias en el Universo	100 mil millones
Deuda externa argentina	200 mil millones dólares

Como vemos en el gráfico, el tamaño de una galaxia es de 6 mil millones de UA (Unidades Astronómicas). Se llama UA a una distancia equivalente a la que hay entre la Tierra y el sol. La edad del universo es de unos 14 mil millones de años. La cantidad de estrellas en una galaxia ronda los 100 mil millones. Y la cantidad de galaxias en el universo es también de unos 100 mil millones.

Pero a los que todavía estén asustados de estos números, les recuerdo que, si son argentinos, no deberían asustarse, porque la deuda externa nuestra es bastante más grande, es una cifra realmente astronómica.

Ahora que tenemos una idea de las escalas, empecemos a ver un poco más en detalle qué son las galaxias. Dada la complejidad de estas observaciones que hacemos con el telescopio espacial, los que hacemos teoría dividimos las galaxias en dos: Espirales y Elípticas.

Aquí vemos una **fotografía de la Vía Láctea**, una espiral típica. La observamos de canto, ya que no podemos salir de la Vía Láctea para observarla desde arriba. La vemos de canto porque la posición del sol en la Vía Láctea es particular: está en el disco donde están la mayoría de las estrellas en la Vía Láctea.



**El disco de la Vía Láctea es la imagen brillante que se ve, puesta de canto, en la cual se observa una componente esférica en la parte central.** Además se pueden ver las galaxias satélites de la Vía Láctea (**Nubes Menor y Mayor de Magallanes**, ya mencionadas).

La otra imagen, a la derecha, es una **galaxia elíptica típica**. Para mí son más bonitas las de la izquierda: tienen forma bastante suave, pulida, esférica, sin demasiada estructura.

Les voy a mostrar otras fotografías, sobre todo espirales, tomadas con el telescopio espacial Hubble. Vemos a continuación la **Galaxia del Sombrero (izquierda)**. Es un disco de estrellas en general. Su forma es intermedia entre las elípticas y las espirales. Tiene una componente esférica, un esferoide, donde las estrellas son en general más viejas que en el disco, que suele estar poblado de

estrellas jóvenes. Y a la derecha vemos otra, de frente, con mucha estructura espiral.



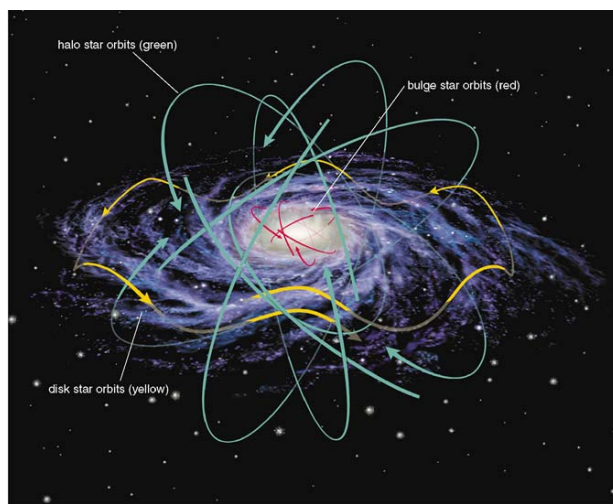
Es posible que nuestra Vía Láctea, vista desde arriba, tenga un aspecto similar a la que vemos en la siguiente imagen (lado izquierdo). En uno de los brazos estaría una estrella (nuestro sol) que está girando alrededor del centro de la galaxia, solidariamente con las otras estrellas.

Y en el lado derecho vemos una galaxia con estructura barreada, es decir que los brazos espirales no parten del centro sino de una barra.



¿Y qué es lo que están haciendo nuestras estrellas?...

## Orbitas de las Estrellas



Existen dos tipos de movimientos característicos en las galaxias.

Algunas, como nuestro sol, están dando vueltas alrededor de la galaxia en una órbita prácticamente circular; están siempre contenidas, orbitando dentro del plano de la galaxia, y apartándose levemente por arriba y por debajo del plano; es decir que tienen leves oscilaciones. Estas estrellas del disco mantienen siempre una distancia fija al centro de la galaxia.

En cambio, las estrellas que están en la zona central, cambian terriblemente con el tiempo: pasan muy cerca del centro y se alejan muchísimo; algo parecido a las órbitas de los cometas alrededor del sol.

**¿Y por qué me estoy preocupando de cómo rotan las estrellas alrededor de una galaxia?...**

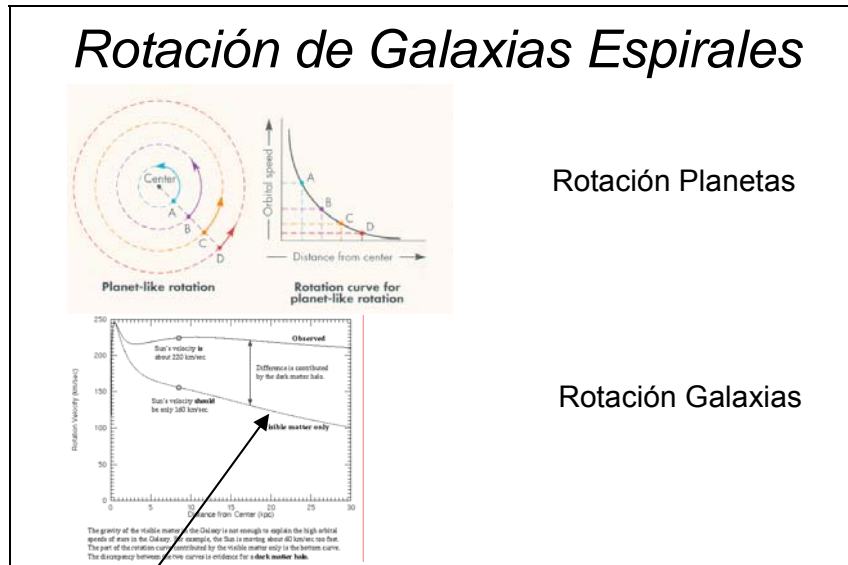
Primero, porque es interesante saber que nuestro Sol, junto con el Sistema Planetario, tarda unos 250 millones de años en dar una vuelta alrededor de la galaxia. En la vida de una galaxia, en la edad del universo, es permitido a nuestra estrella, nuestro sol, dar varias vueltas.

**¿Y por qué me preocupo de esto?... ¿Por qué la gente se ha preocupado de cómo giran las estrellas alrededor de la galaxia?...**

Con un poco de física (si se piensa en cómo rotan los planetas y conociendo la masa del sol, la velocidad con que los planetas giran alrededor del sol y la distancia) uno puede estimar a qué velocidad se deberían estar moviendo los planetas. Cuando uno hace ese ejercicio, encuentra un acuerdo prácticamente perfecto entre lo que uno predice y la velocidad con que se van moviendo los planetas: los planetas más cerca del centro se mueven muchísimo más rápido que los que están a grandes distancias del sol.

Pero en las galaxias no observamos esto. Las galaxias tienen una particularidad: prácticamente, independientemente de la distancia al centro de la galaxia, todas las estrellas están dando vueltas a la misma velocidad.

Cuando uno predice, en base a la luz que uno ve, a la materia (al igual que con el sol) cuál es la curva, cuál es la velocidad a la que deberían estar rotando las estrellas, esto es lo que dicen los modelos:



**A esta velocidad** se deberían estar moviendo las estrellas (150 Km./seg.). Sin embargo, cuando medimos las velocidades de las estrellas y nuestra propia velocidad, descubrimos que son mucho más altas (250 Km./seg.).

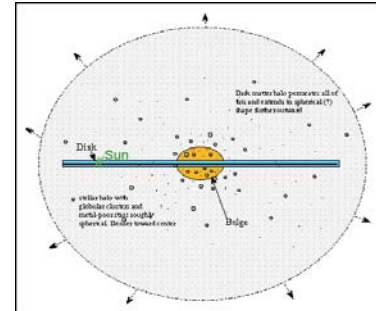
Entonces, haciendo lo mismo que hacíamos en el cuadro de arriba, podemos predecir cuál es la masa que debería haber. Predecimos cuál es la masa que tiene el sol, y eso concuerda con las velocidades que medimos. Predecimos la masa que debería haber ahí adentro, y descubrimos un defasaje, una cantidad de masa faltante: Las estrellas se están moviendo demasiado rápido para la masa que observamos en estrellas. Este problema se conoce como *el problema de la materia oscura*. No queda prácticamente ninguna otra idea, más que asentar el hecho de que debe haber masa ahí, la cual no somos capaces de observar.

Si se piensa un poco, no necesariamente toda la masa que uno ve debe ser masa brillante. Por ejemplo, si se tiene la posibilidad de observar unas fotos del planeta Tierra tomadas durante la noche desde un satélite, se puede ver que es muy notable delinear las ciudades; uno puede darse cuenta dónde están Bs. As., New York, San Pablo, París, etc. debido a la cantidad de luz que proviene de esos lugares. Es también muy fácil delinear algunos contornos de los continentes; por ejemplo, el contorno de Europa se puede delinear porque está llena de ciudades que emiten gran cantidad de luz. Sin embargo, de esas fotografías es imposible darse cuenta que existen las montañas, los océanos, los bosques... Algo similar parece que puede estar ocurriendo en astronomía.

Estamos observando el universo “de noche”; vemos sólo las cosas que brillan, y no vemos las cosas que no brillan.

## *Materia Oscura*

- Partículas elementales
- No emiten radiación (luz)
- Detectable por su influencia gravitacional sobre las galaxias
- 15% materia ordinaria + 85% materia oscura



Es por eso que creemos que el universo estaría lleno de gran cantidad de material no brillante. Entonces no ha quedado más remedio que imaginarlas como a la Vía Láctea, por ejemplo, un disco de estrellas rotantes, con una componente esférica en la parte central, más enormes cantidades de materia oscura. El 85 % de la materia total, aproximadamente, sería materia oscura, y sólo el 15 % materia ordinaria.

**¿Y por qué me preocupa esto?...** Porque al igual que las olas arrastran los objetos más livianos en el océano, la materia oscura arrastra el gas y las estrellas; y al ser tan dominante en masa, no le queda más remedio a los componentes más livianos que obedecer lo que ordena la materia oscura.

Por eso, a partir del descubrimiento de estas grandes cantidades de materia oscura que llenan el universo, los modelos tuvieron que cambiar; tuvieron que influir grandes cantidades de materia no visible en el universo. Aún no se ha descubierto qué tipo de partículas son. Existen algunos candidatos, como algún tipo de partículas elementales, pero creemos que son partículas que no interactúan, que no emiten radiación, pero que sí es posible detectarlas por su interacción gravitacional con la materia visible.

Una vez que sabemos qué son y de qué están hechas las galaxias, tenemos que pensar en cómo se formaron, cómo ha ido evolucionando la historia del universo.

## Historia del universo

- El universo se está expandiendo
- Esto significa que anteriormente era más pequeño
- En las primeras etapas del universo
  - Había más galaxias
  - Estaban más cerca unas de otras
  - Interactuaban más

Después de **Hubble**, el universo no es más estático, sino que es un sistema que ha cambiado. Sabemos –por algunos datos de la cosmología- que el universo ha ido evolucionando desde el Big Bang (el origen del tiempo), y durante 14.000 millones de años, más o menos como lo indica la figura.

Al principio el universo era prácticamente homogéneo y no existían las galaxias. Estas fueron apareciendo a medida que el universo fue envejeciendo. Si pensamos en el universo como en un adolescente de 14 años, diremos que las primeras galaxias aparecieron cuando tenía aproximadamente un año, a partir de lo que llamamos **un XXXX** ( $10^9$  años). Esas primeras galaxias eran muy diferentes a las galaxias que vemos hoy.

Una cosa interesante es que, si el universo está expandiéndose, podemos comprender que, atrás en el tiempo, las distancias entre galaxias eran menores y era inevitable la interacción entre ellas. Las galaxias no son objetos aislados que evolucionan solas en el universo, sino que hay muchísima interacción con los “vecinos”. Son, en ese sentido, hijos con hermanos más que hijos únicos.

Tenemos observaciones de cómo son las galaxias ahora y cómo eran de jóvenes. Lo que nos falta ahora entender es cómo se formaron las galaxias en el universo, y para eso voy a darles una receta, con ingredientes e instrucciones para formar una galaxia.

Los ingredientes que necesitamos son bastante sencillos, aunque en cantidades importantes para formar la cantidad de galaxias que tenemos en el

universo. Básicamente, lo que necesitamos es materia ordinaria, lo que llamamos bariones, protones, electrones y neutrones. Ahora sabemos que necesitamos también materia oscura.

Las porciones que salen con esta receta son bastante abundantes (unas 100.000 millones de porciones, o sea de galaxias).

## *Ingredientes Para Hacer una Galaxia Exquisita*

**Ingredientes:** Electrones y Protones  
Partículas de Materia Oscura



**Porciones:** Rinde 100 mil millones de porciones

Cuando ya tenemos los ingredientes, hay que poner manos a la obra:

Se comienza a partir de ese universo terriblemente homogéneo que había al principio, una mezcla muy homogénea de materia oscura, electrones, protones y neutrones.

Batir hasta formar una pasta completamente homogénea. Pero no exagere; permita que sobrevivan pequeñísimos grumos, los cuales serán las semillas de los objetos, de las galaxias que vamos a formar.

Estos grumos tienen que ser tan pequeños, que la fluctuación respecto de la densidad media en esta masa cósmica tiene que ser solamente de **uno en 100.000**, pequeñísimas fluctuaciones que solo la más reciente tecnología (como el **satélite Hubble**) ha permitido medir.

Colocar estos ingredientes en el horno, en una bandeja, la cual sabemos que está en expansión, y dejarlo allí 14.000 millones de años para su cocción.

## *Instrucciones Para Hacer una Galaxia Exquisita*

### 1) Preparación

Mezclar la materia oscura con los electrones y protones

### 2) Batido

Formar una pasta muy muy homogéneo. Permita que sobrevivan grumos pequeñísimos ( $10^{-5}$ )

### 3) Horneado

Colóquelo en un universo en expansión

### 4) Cocción

Tiempo de cocción: 13.5 mil millones de años

Cuando seguimos estas instrucciones, terminamos formando galaxias. Pareciera que estos son los ingredientes teóricos de cómo se debe hacer una galaxia. Pero en realidad, conceptualmente, lo que pensamos es que las galaxias [espirales] se formaron a partir de esas **nubes homogéneas de gas y materia oscura** que se expandían.

## *Formación de Galaxias Espirales*

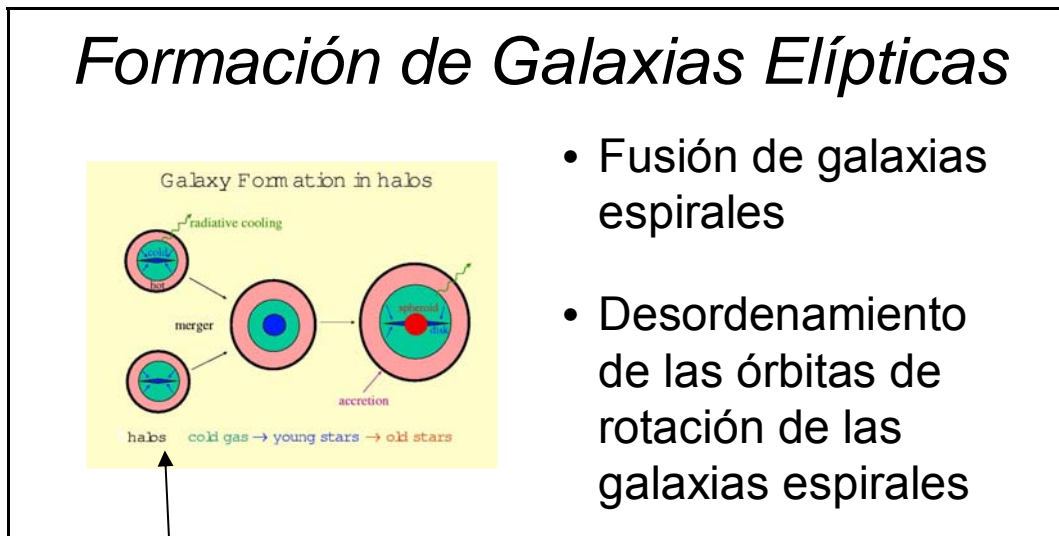


- Nube protogaláctica inicial de gas y materia oscura
- El gas colapsa a un disco rotante
- El gas se convierte en estrellas donde quedan en equilibrio circular

Pensamos que estas nubes formaban parte de la expansión universal de la misma forma que ahora se están expandiendo las galaxias, hasta que llegaron a cierto punto en que la gravitación, el propio peso, las hizo colapsar. (47:00) Un poco de momento angular que han adquirido han hecho que el colapso no ha sido a una componente esferoidal, sino algo más o menos discoidal, donde se forman las estrellas.

Esto es un modelo bastante sencillo. Parte solamente de la imaginación de los teóricos. Pero ahora sabemos –hemos cambiado la idea en los últimos años– cómo se forman las elípticas. Creemos que las galaxias elípticas, que son tan

brillantes, tan pulidas y tan esféricas, no se forman de la misma manera; sino que se forman por el choque, por la interacción, de dos galaxias espirales:



**Si nos fijamos** en la interacción, el choque, de dos galaxias, forma lo que creemos que es un objeto de tipo esférico donde, a presión de nuevo gas, puede dar lugar al renacimiento de discos espirales alrededor de las galaxias.

Todo esto se ve muy bonito; pero la astronomía necesita basarse en algo más que simples palabras y dibujitos. En ese sentido, somos un poco más ambiciosos que **Silver**, en el sentido de hacer hermosas animaciones que muestren cómo se han formado las galaxias...

Sucede que la astronomía como ciencia experimental es muy difícil, porque se pueden hacer muy poquitos experimentos, es decir que es una ciencia fundamentalmente observacional (ponemos un telescopio y lo único que podemos hacer es observar la luz; y podemos hacer algunos experimentos con la luz, pero no podemos hacer un laboratorio en el fondo de nuestra casa y formar una galaxia o un planeta).

Pero sí lo podemos hacer en un volumen aún más reducido, como es en una computadora. Uno puede “poner” condiciones iniciales en una computadora; “decir” cómo era el universo primitivo; “poner” las leyes de la física que creemos que gobiernan la formación de las galaxias; permitir que la computadora haga las cuentas, que simule que el tiempo está pasando sin que le lleve 14.000 millones de años hacer el cómputo; que le lleve menos tiempo, pero que simule, que imite, que ha pasado todo ese tiempo. Una vez que finaliza el programa, hacemos comparaciones de qué es lo que predice con qué es lo que uno observa.

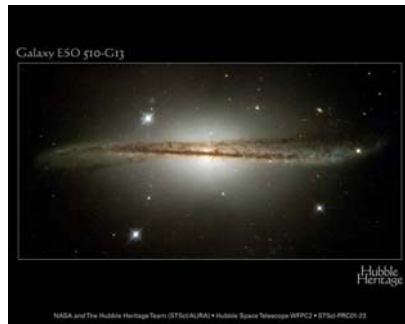
## *El Universo en una Computadora*

- La Astronomía es una ciencia fundamentalmente observacional, no experimental
- La computadora como un laboratorio
- Condiciones iniciales del universo primitivo
- Leyes de la física
- Evolución temporal
- Comparación con las observaciones



Lo que vemos a continuación son algunas imágenes de lo que llamamos *galaxias irregulares* (o *galaxias interactuantes*). Todos estos modelos han sido de galaxias que crecen, de galaxias grandes que prácticamente no tienen interacción con galaxias vecinas. Algunas de ellas muestran sus estructuras bastante distorsionadas, debido –presumiblemente- a interacciones con otras.

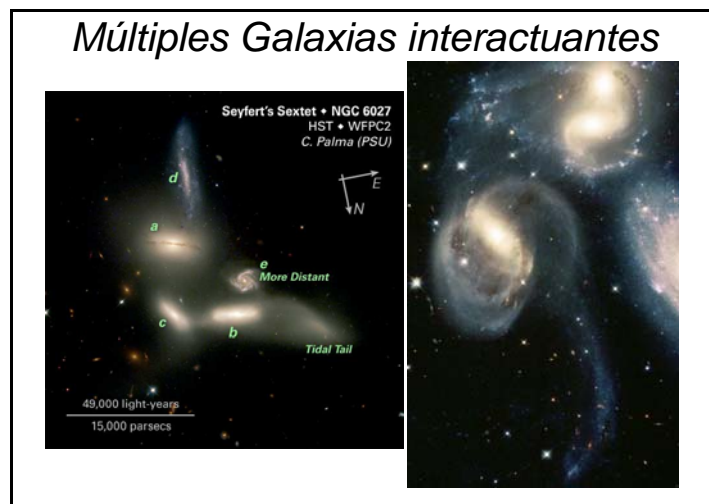
## *Galaxias Irregulares*



O muestran pares de galaxias, donde forman **colas de estrellas**, que dan lugar al nacimiento de nuevas estrellas, y que intercambian material entre ellas debido a su proximidad: Las galaxias chocan, interactúan, intercambian estrellas como nuestro sol.



En la siguiente imagen se puede ver que existe una gran distorsión en la apariencia de las galaxias. Creemos que la interacción entre las galaxias es un proceso fundamental para explicar las formas que ellas muestran.



Hoy en día contamos con simulaciones que predicen, por ejemplo, lo que va a pasar cuando la Vía Láctea, nuestra galaxia, choque con Andrómeda, la galaxia vecina más cercana. La Vía Láctea tiene estructura espiral. Las dos galaxias se van a ir acercando cada vez más hasta que van a empezar a interactuar. La órbita de nuestro sol va a cambiar completamente. El sol va a pasar de una galaxia a otra. Y la identidad de estas dos galaxias va a terminar desapareciendo, porque ambas se van a fundir en una sola galaxia que se parecerá muy probablemente más a una elíptica. Probablemente nuestra estrella (el sol) y nosotros mismos no sobrevivamos a semejante choque cósmico.

Al chocar ambas galaxias, se podría apreciar cómo el gas forma estructuras espectaculares, de tamaño varias veces el tamaño de las mismas galaxias. Hay también una componente adicional de agujeros negros en las partes centrales; estos agujeros negros son en verdad los responsables de generar estos desastres cósmicos.