



ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ASTRONOMÍA

Workshop sobre
**Astronomía Teórica en Argentina:
Problemas y Perspectivas**

Córdoba, 10 y 11 de mayo de 2007

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ASTRONOMÍA

Fundada en 1958

Pers. Jurídica (Legajo 21.459 – Matr. 1.421), Pcia. de Buenos Aires

Comisión Directiva

PRESIDENTE: Dr. Gustavo E. Romero
VICEPRESIDENTE: Dr. Hernán Muriel
SECRETARIA: Dra. Sofía A. Cora
TESORERA: Dra. Paula Benaglia
VOCAL 1^{RO}: Dr. Mario G. Abadi
VOCAL 2^{DO}: Dr. Sergio A. Cellone
VOCAL SUP. 1^{RO}: Dra. Zulema González de López García
VOCAL SUP. 2^{DO}: Dr. Pablo J. D. Mauas

Comisión Revisora de Cuentas

TITULARES: Dra. Cristina E. Cappa
Ing. Pablo Recabarren
Dr. Roberto Gamen
SUPLENTE: Dra. Irene Vega
Dr. Adrián Rovero

Comité Nacional de Astronomía

SECRETARIO: Dr. Roberto O. Aquilano
MIEMBROS: Dra. Andrea Costa
Dra. Andrea V. Ahumada
Dr. Mario G. Abadi

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE ASTRONOMÍA

Workshop sobre **Astronomía Teórica en Argentina: Problemas y Perspectivas**

Córdoba, 10 y 11 de mayo de 2007

Comité Organizador

Dr. Gustavo E. Romero
Dr. Hernán Muriel
Dra. Sofía A. Cora
Dra. Paula Benaglia
Dr. Mario G. Abadi
Dr. Sergio A. Cellone

Comité Editorial

Dr. Sergio A. Cellone
Dra. Paula Benaglia

Nota editorial

Los días 10 y 11 de mayo de 2007 se celebró en el Observatorio Astronómico de Córdoba el *Workshop sobre Astronomía Teórica en Argentina: Problemas y Perspectivas*. Esta fue la segunda de una serie de reuniones organizadas por la Asociación Argentina de Astronomía para discutir problemas de actualidad para la comunidad científica con interés en las áreas de astronomía y astrofísica. La reunión previa fue dedicada a diferentes aspectos de la astronomía observacional. En la presente oportunidad unos 50 participantes se dieron cita para plantear problemáticas relacionadas con la investigación teórica en nuestro país. Se discutieron temas relacionados con política científica, métodos de investigación en el campo teórico, aspectos filosóficos de la ciencia, la relación entre la teoría y la observación, así como temas de investigación particulares. El presente volumen contiene apenas unas cuantas de las presentaciones realizadas, pero creemos que permite vislumbrar la naturaleza del evento.

Deseamos agradecer al Observatorio Astronómico de Córdoba y su personal por haber brindado el auditorio e instalaciones donde se realizó el workshop así como parte del apoyo económico y logístico. Agradecemos, además, la desinteresada colaboración de la Dra. Valeria Coenda y la Dra. Laura Sales.

Comisión Directiva AAA

Programa

JUEVES 10 DE MAYO

Primera Sesión

- 8:45 Palabras de bienvenida
- 9:00 Reflexiones sobre relación entre la teoría y la observación en la investigación astrofísica (informe invitado). *Gustavo Romero.*
- 9:50 Teoría de perturbaciones en sistemas dinámicos (informe invitado). *Cristian Beaugé.*
- 10:40 (Café.)
- 11:00 Accesibilidad y análisis estadísticos (informe invitado). *Mariano Domínguez.*
- 11:50 Observatorios virtuales (informe invitado). *Patricia Tissera.*
- 12:40 (Almuerzo.)

Segunda Sesión

- 14:30 De qué hablamos cuando hablamos de ciencia teórica en nuestra práctica profesional como científicos (informe invitado). *Andrea Costa.*
- 15:20 Estructura orbital regular y caótica en sistemas estelares triaxiales (informe invitado). *Juan Carlos Muzzio.*
- 16:10 (Café.)
- 16:30 Modelos semiempíricos de atmósferas estelares (informe invitado). *Pablo Mauas.*
- 17:20 Programación semi-definida (contribución oral). *Richard L. Branham.*
- 17:40: Satélites numéricos y semi-numéricos (contribución oral). *Laura Sales.*

VIERNES 11 DE MAYO

Tercera Sesión

- 9:00 El enfoque estadístico en problemas astronómicos (informe invitado). *Diego García Lambas*
- 9:50 Modelos semianalíticos de formación jerárquica de galaxias (informe invitado). *H. Julian Martínez.*
- 10:40 (*Café.*)
- 11:00 Formación académica en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP (informe invitado). *Pablo Cincotta.*
- 11:50 El problema de la difusión caótica en el espacio de fases (contribución oral). *Pablo Cincotta.*
- 12:10 Evolución dinámica de objetos entre las resonancias 3:2 con Neptuno y 2:3 con Urano (contribución oral). *Francisco López García.*
- 12:30 Evolución de galaxias y QSOs: observaciones y teoría (contribución oral). *Sebastian Lipari.*
- 12:50 (*Almuerzo.*)

Cuarta Sesión

- 14:30 Simulaciones numéricas en astronomía (informe invitado). *Mario Abadi.*
- 15:20 Confrontando teorías físicas con la cosmología (informe invitado). *Héctor Vucetich.*
- 16:10 (*Café.*)
- 16:30 Mesa Redonda
- 18:30 *Cierre del Workshop.*

Lista de participantes

Mario G. Abadi (IATE – OAC)
Andrea Ahumada (OAC)
Roberto Aquilano (UNR)
Cristian Beauge (OAC)
Richard L. Branham, Jr. (IANIGLA – CONICET)
Pablo Cincotta (FCAG, UNLP)
Sebastian Coca (OAC)
Valeria Coenda (IATE – OAC)
Jorge Correa (UNSJ)
Andrea Costa (IATE – OAC)
Eugenia Díaz (IATE – OAC)
Mariano Domínguez (IATE – OAC)
Fabio Faifer (IALP – FCAG, UNLP)
Beatriz García (UTNRM)
Diego García Lambas (IATE – OAC)
Germán Gimeno (OAC)
Claudia Giordano (FCAG, UNLP)
Luciana Gramajo (OAC)
Marcelo Lares (IATE – OAC)
Martín Leiva (OAC)
Francisco López García (CASLEO)
Héctor Julián Martínez (IATE – OAC)
Manuel Merchán (IATE – OAC)
David Merlo (OAC)
Hernán Muriel (IATE – OAC)
Juan Carlos Muzzio (IALP)
Hugo Navone (UNR – IFIR)
Mónica Oddone (OAC)
Gabriel Oio (OAC)
Ana Laura O'Mill (IATE – OAC)

Tali Palma (OAC)
Celeste Parisi (OAC)
Dante J. Paz (IATE – OAC)
Olga Pintado (G. de Astron. Tucumán)
Pablo Recabarren (IATE – OAC)
Gustavo Romero (IAR – FCAG, UNLP))
Andrés N. Ruiz (OAC)
Laura V. Sales (IATE – OAC)
Ariel Sánchez (IATE – OAC)
Ana Laura Serra (OAC)
Mario Sgro (OAC)
Analía Smith Castelli (FCAG, UNLP – IALP)
Federico Stasyszyn (IATE – OAC)
Patricia Tissera (IAFE)
Carlos Valotto (IATE – OAC)
Luis Vega (IATE – OAC)
Héctor Vucetich (IALP)
Walter Weidmann (OAC)

Índice general

Nota editorial	VII
Programa	IX
Lista de participantes	XI
Bases de Datos en Astronomía: Accesibilidad y Análisis Estadísticos	
<i>M. J. Domínguez</i>	1
Ciencia teórica: entre la necesidad lógica y la contingencia	
<i>A. Costa</i>	9
Estructura orbital regular y caótica en sistemas estelares triaxiales	
<i>J. C. Muzzio</i>	17
Programación semi-definida en astronomía	
<i>R. L. Branham, Jr.</i>	29
Modelos semianalíticos de formación de galaxias	
<i>H. J. Martínez</i>	33
Formación académica de un astrónomo	
<i>P. M. Cincotta</i>	39
Evolución dinámica de objetos tipo Centauros	
<i>F. López García, J. Correa</i>	47
The role of exploding QSOs in explosive models of evolution, formation and end of galaxies	
<i>S. Lípári et al.</i>	55
Teorías físicas y Cosmología	
<i>H. Vucetich</i>	61

INFORME INVITADO – INVITED REVIEW

Bases de Datos en Astronomía: Accesibilidad y Análisis Estadísticos

Mariano Javier de León Domínguez Romero ^{1,2,3}

(1) *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE)*

(2) *Observatorio Astronómico Córdoba - (OAC) - UNC*

(3) *CONICET*

Resumen. Los actuales instrumentos científicos y simulaciones por computadoras están creando grandes cantidades de datos que requieren nuevos métodos de análisis y organización. Los volúmenes de datos científicos se duplican aproximadamente cada año. Como los nuevos instrumentos poseen precisiones extraordinarias, la calidad de datos también experimenta un proceso de rápida mejora.

Analizar los datos para encontrar efectos y sistematicidades no encontradas en estudios previos requiere algoritmos que puedan tratar simultáneamente con conjuntos gigantes de datos y puedan encontrar efectos muy sutiles. En esta charla se revisan cómo las bases de datos ayudan al quehacer astronómico y qué desafíos científicos podemos encontrar en relación a la exploración de las mismas, desde el punto de vista algorítmico.

1. Paradigmas científicos

La ciencia computacional es una nueva rama de muchas disciplinas. En sus comienzos la ciencia era empírica, describiendo los fenómenos naturales. En los últimos trescientos años se desarrolló teóricamente, utilizando modelos y realizando generalizaciones. En las últimas décadas se desarrolló una rama computacional, principalmente para simular fenómenos complejos. Esta se desarrolló gracias a nuestra falta de habilidad para encontrar soluciones en forma cerrada para los modelos matemáticos desarrollados.

Actualmente la exploración de datos (eScience) unifica teoría, experimentos y simulaciones utilizando técnicas estadísticas sobre los datos capturados por instrumentos, o generados en simulaciones. Luego este nuevo énfasis en informática se traslada de la realización de simulaciones hacia la captura, organización, summarización, análisis estadístico y visualización de los datos.

Como cualquier otro campo de la ciencia, la astronomía se encuentra enfrentando un incremento exponencial en el volumen, complejidad e incluso en calidad de los datos. Ya sean provenientes de las observaciones actuales (por ejemplo relevamientos masivos digitales del cielo) o de las simulaciones numéricas de procesos y fenómenos que no pueden ser estudiados de una manera analítica (por ejemplo: la formación de estructuras en el universo, o las explosiones de supernovas, etc).

Este crecimiento exponencial está conducido por el progreso en las tecnologías de la información (IT), y como consecuencia nos encontramos ante un volumen de información en astronomía que se duplica cada 12-18 meses. Con más de un

PB actualmente archivado y con una tasa de adquisición de datos del orden de varios TB/día para toda la astronomía mundial. Conjuntos de datos medidos en decenas de TB son hoy comunes y conjuntos de datos de varios PB se encuentran en el horizonte, en particular en la forma de grandes relevamientos sinópticos del cielo.

La demanda de herramientas y recursos computacionales para realizar análisis de datos crece aún más rápidamente que los volúmenes de datos. Esto es consecuencia de tres fenómenos: (1) Algoritmos más sofisticados consumen más instrucciones para analizar cada byte. (2) Muchos algoritmos de análisis escalan cuadrática/cúbicamente con el número de puntos. (3) El ancho de banda de IO no escala con la capacidad de almacenamiento. Estas tendencias implican que los análisis implican tiempos mayores. Para aminorar estos problemas, los astrónomos necesitan mejores algoritmos de análisis que puedan tratar grandes conjuntos de datos con aproximaciones y algoritmos paralelizables que puedan aplicarse utilizando muchos procesadores y discos.

Los actuales conjuntos de datos en la escala de Peta-bytes requieren un nuevo estilo de trabajo. Hoy en día el científico típico copia archivos a un servidor local y los trabaja utilizando fuentes locales y propias. Pero cuando los conjuntos de datos se tornan masivos y los programas de aplicaciones más complejos, resulta mucho más económico mover los programas del usuario hacia los datos y solo transmitir preguntas y respuestas en lugar de desplazar los datos y las aplicaciones al sistema local del usuario.

Los centros de datos científicos que pueden proveer accesos a los datos y a las aplicaciones que los analizan están emergiendo en todas las áreas del quehacer científico. Cada uno de estos centros de datos almacena y preserva uno o más conjuntos de datos y proveen las aplicaciones que proveen acceso a los mismos. en general soporta al personal que entiende los datos y continuamente añade más o los mejora.

El nuevo estilo de trabajo en estos dominios es enviar preguntas a aplicaciones corriendo en los centros de datos y recibir respuestas en lugar de transferir una copia de los datos en crudo al servidor local para un posterior análisis. Emergiendo una tendencia a almacenar un espacio de trabajo personal (una MyDB) en el centro de datos donde depositar las respuestas. Esto minimiza el tráfico de datos y permite la colaboración de los científicos que desarrollan el análisis conjunto de los mismos. Estos espacios personales de trabajo son también un vehículo para colaboraciones en los estudios, así como pueden tornarse un vehículo para la publicación: colocando los programas utilizados y los resultados en el dominio público.

Algunos científicos pueden traer pequeños conjuntos de datos a “casa” para el procesamiento local y visualización, pero la tendencia indica que todo podrá realizarse en el centro de datos utilizando el espacio personal. Cuando un científico intenta correlacionar datos de dos centros diferentes, entonces no queda más opción que movilizar parte de los datos. Si esto resulta común, los centros de datos pueden federarse y proveer copias mutuas de backup, dado que el tráfico justifica su realización.

La comunidad astronómica ha respondido a estos desafíos con el concepto de Observatorio Virtual (VO): un ambiente de investigación basado en la web (geográfica e institucionalmente distribuido) que almacena conjuntos masivos y complejos

de datos, el cual provee infraestructura computacional para el análisis y exploración de los datos. Como ejemplos podemos mencionar: el US National Virtual Observatory, el European Virtual Observatory, el German Virtual Observatory entre muchos otros.

2. Datos en DB de Astronomía

En el caso de astronomía utilizamos los datos entre otras cosas para buscar nuevas clases de objetos o más de tipos interesantes (cuásares, lentes gravitatorias, planetas extrasolares, etc.); variaciones en densidad (PDF) y correlaciones en un espacio de aproximadamente 400 dimensiones. Dado que la cantidad de datos se duplica cada 2 años y los datos se publican en general después de 2 años de obtenidos, entonces un 50% de los datos es de dominio público. Algunos observatorios tienen acceso privado a un 5% más. Por lo tanto el acceso público general a los datos es la norma en nuestra comunidad.

Esto se ve favorecido por la generalizada adopción del “The Astronomers Data Manifesto” (Norris 2007) del cual se transcriben los puntos más salientes a continuación:

- 1. All major tables, images, and spectra published in journals should appear in the astronomical datacentres.
- 2. All data obtained with publicly-funded observatories should, after appropriate proprietary periods, be placed in the public domain.
- 3. In any new major astronomical construction project, the data processing, storage, migration, and management requirements should be built in at an early stage of the project plan, and costed along with other parts of the project.
- 4. Astronomers in all countries should have the same access to astronomical data and information.
- 5. Legacy astronomical data can be valuable, and high-priority legacy data should be preserved and stored in digital form in the data centres.
- 6. The IAU should work with other international organisations to achieve our common goals and learn from our colleagues in other fields.

Es de destacar la importancia que toman los puntos 1,2 y 4 en su conjunto para el trabajo de los astrónomos argentinos con datos de facilidades observacionales de otro modo inaccesibles. Así es posible mediante las siguientes bases de datos de la NASA acceder a los datos observacionales de telescopios espaciales como: Chandra, HST, Spitzer y WMAP entre otros.

Rango espectral	Centro de datos
altas energías	High Energy Astrophysics Science Archive Center (HEASARC)
óptico	Multimission Archive at the Space Tel. Sci. Institute (MAST)
infrarrojo	NASA/IPAC Infrared Science Archive (IRSA)
radio	Legacy Archive for Microwave Backg. Data Analysis (LAMBDA)

Los datos obtenidos de sistemas planetarios: NASA Star and Exoplanet Database, el sistema solar: Sol y Plasma: The Virtual Solar Physics Observatory y los

planetas: Planetary Data System, Horizons, NASA Earth Observatory, Terra-Server, Google, etc., también son accesibles mediante las bases de datos mencionadas.

Todos los grandes observatorios basados en tierra, entre los que podemos mencionar a la fecha los siguientes:

Características	Telescopios
10m:	South African Large Telescope (SALT), Keck (x2)
8m:	Very Large Telescope (x4), Gemini (x2), Subaru, Hobby Eberly Telescope (HET)
6.5m:	Magellan (x2), Multiple Mirror Telescope
4m:	many, including Blanco at CTIO
Radio:	VLA, EVLA, JIVE
Ondas Grav.	LIGO
Partículas	SNT (Neutrino), AUGER, COUPP (WIMPS), CAST (Axions)

y finalmente los grandes relevamientos de galaxias (2dFGRS, SDSS, 2MASS, HDF, UDF, COSMOS, MUSYC, VVDS, GDDS, RASS, HIPASS etc) y de estrellas-IGM: (SDSS, WEBDA, RAVE) permiten también el acceso a los datos con diversos niveles de reducción y completitud. Todo esto permite abordar el estudio en diferentes dimensiones espectrales, así como la temporal de las fuentes astrofísicas, esto otorga una suma importancia al problema de una eficaz identificación espacial en diferentes catálogos del mismo objeto.

Por otra parte, cada vez más resultados de simulaciones numéricas se ponen a disposición de la comunidad, entre otros hoy es posible acceder a predicciones de: estructura en gran escala y modelos de formación de galaxias: Virgo Consortium, GaLyCS; el universo temprano: CMB: FAST, EASY, WARP, COSMOS-MC, BBN models; SEDs: BC03, Padova (database of stellar evolutionary tracks and isochrones), SPEED (Spectral Evolution from Edinburgh-Penn) y modelos de evolución de cúmulos globulares, medio interestelar y polvo, etc.

3. Uso de una base de datos

Recordemos que una base de datos (relacional) como las recientemente mencionadas es una aplicación que permite almacenar y recuperar datos rápidamente. El bit relacional indica cómo los datos están almacenados y cómo están organizados. SQL (Structured Query Language) es un lenguaje simple que provee instrucciones para construir y modificar la estructura de la base de datos y para modificar los datos almacenados en las tablas. Todo análisis en una base de datos puede hacerse con aplicaciones estándares (C++, Fortran90 mezclado con SQL, etc.). Los Sistemas de Administración de Bases de Datos (DBMS) están diseñados para indexar, hacer búsquedas y accesos rápidos, (a veces en paralelo) sin movilizar los datos (hoy en día un servicio web).

Tomaremos como ejemplo el Sloan Digital Sky Survey (varios TB) – por lejos el mayor archivo digital en astronomía por estos días – para una descripción de las características de las bases de datos y formas de acceso. Los datos de este relevamiento son recogidos por un telescopio dedicado de 2.5 m en Apache Point, NM, equipado con una cámara de 120 Mpx y un par de espectrógrafos

que pueden medir 600 objetos simultáneamente. Los datos son procesados en el Fermilab, donde un cluster Beowulf arma los catálogos, que son cargados en una base SQL.

Para una estima del volumen de datos involucrado, bastan observar algunos números en la siguiente tabla:

Catálogo de Objetos	6000 GB	parámetros de >108 tipos de objetos
Catálogo de Redshifts	1 GB	parámetros de 106 tipos de objetos
Atlas de Imágenes	1500 GB	en 5 colores >tipos de 108 objetos
Espectros	60 GB	de una forma uni-dimensional
Catálogos Derivados	20 GB	cúmulos, líneas de abs. en QSO
Mapa de todo el cielo	60 GB	altamente comprimidos
Frames Corregidos	15 TB	TODO PUBLICO!

Los datos binarios en crudo están disponibles (via wget and rsync) como archivos disponibles en el Data Archive Server (DAS). Los parámetros científicos son extraídos de los datos y están disponibles mediante avanzadas interfaces de búsqueda desde el Catalog Archive Server (CAS). El CAS es una colección de servidores de bases de datos SQL, cada uno almacenando una versión particular (release) de los datos del SDSS. Entre estos servidores destacan:

- *SkyServer.dsss.org* ó *cas.sdss.org*: sitio público Web que ofrece acceso a los datos del SDSS, documentación de los datos y contenidos educacionales en línea en varios idiomas (inglés, castellano, japonés, etc.).
- *Portales de la Colaboración*: sitios web separados operados por miembros de la colaboración (con acceso restringido) que permiten realizar tareas en hardware dedicado. Miembros de la colaboración usualmente tienen acceso a los datos por unos pocos meses previos a la liberación pública de los datos (release).
- *Observatorio Virtual*: una colección de servicios web desarrollados por la comunidad astronómica como parte de los esfuerzos para construir un VO mundial (extractores y selectores de imágenes por ej.).
- *CasJobs* (batch jobs for the CAS): un servicio web público que permite a los usuarios crear una base de datos personal (MyDB) en un servidor del Fermilab.

Los sitios públicos tienen aproximadamente tres veces más tráfico (page views o SQL queries) que los sitios de la colaboración. Es notable el importante uso del sitio Educativo. Se puede notar un uso sostenido en el tiempo de todos los releases, indicando la importancia de conservar la información parcial liberada en cada uno de ellos con fines de comparación.

3.1. SQL básico

SQL es el acrónimo de Structured Query Language y es un lenguaje simple que provee instrucciones para construir y modificar la estructura de una base de datos. Y también para modificar los datos almacenados en tablas. Los principales comandos utilizados son:

- Select: busca una columna de datos.
- Insert: Inserta una o más columnas de datos.
- Update: Modifica columnas existentes de datos.
- Delete: Borra columnas de datos.
- From: Especifica sobre que tabla se ejecuta el comando.

Bases de datos Open Source como MySQL son similares en calidad a sus adversarios comerciales y son muy utilizadas. Diversos ejemplos introductorios (con variada complejidad) de búsquedas de datos utilizando el lenguaje SQL pueden obtenerse y aplicarse en CASJobs. Nuevas bibliotecas por ejemplo para optimizar las búsquedas espaciales como Hierarchical Triangular Mesh (HTM) de Szalay et al. (2007) han sido desarrolladas como extensiones para SQL. Estas herramientas permiten acelerar las búsquedas de objetos astrofísicos entre diferentes catálogos, almacenados en diferentes lugares, como en (SkyQuery). Este tipo de herramientas son el prototipo de las que utilizaremos en los VO en los próximos años. Una interesante utilidad es la posibilidad de interacción entre paquetes de software estadísticos como R e IDL con bases de datos accesibles via web, disponible por ejemplo para la interacción con los datos de las simulaciones Millennium mediante el observatorio virtual germano véase: GAVO.

4. Exploración de datos y estudios estadísticos

Entre los análisis estadísticos típicos que desarrollamos con los datos podemos contar: la creación de muestras uniformes, aplicación de filtros, ensamblado de submuestras relevantes, estimas de completitud, descarte de datos erróneos, conteos y construcción de histogramas, generación de muestras Monte-Carlo y cálculo de *likelihoods* de los parámetros del modelo utilizado en la interpretación. En el caso de conjuntos masivos de datos podemos explorarlos de forma manual o automática. Existen diversos métodos automáticos que permiten dado un espacio arbitrario de parámetros encontrar: cúmulos de datos, puntos entre cúmulos de datos, cúmulos de datos aislados, vacíos en cúmulos de datos y puntos aislados; en éstos la computadora sugiere hipótesis y la persona evalúa su significación.

Nuevos tipos de fenómenos (por ej. galaxias lenteadas gravitacionalmente) pueden ser descubiertos aplicando métodos de Reconocimiento Automático de Patrones en las Imágenes (recordando que cada algoritmo de detección de objetos tiene sus sesgos y limitaciones), así como realizando análisis multiescala en el dominio temporal (por ej. supernovas y estrellas variables). Dado que los datos y las computadoras crecen a la misma tasa, necesitamos métodos que escalen como $N * \log N$, con N el número de datos. Las estadísticas tradicionales escalan pobremente: las funciones de correlación $\sim N^2$, y las técnicas de likelihood $\sim N^3$. Algunos algoritmos rápidos y eficientes que combinan la estadística con la informática han sido desarrollados: Tree-codes para correlaciones (A. Moore et al. 2001), Fast CMB analysis (Szapudi et al. 2001) basados en métodos de reducción dimensional (PCA por ejemplo) y paralelización. Desde un punto de vista algorítmico importantes desafíos relacionados con la exploración de bases de datos restan ser resueltos.

Diversos grupos en el mundo se encuentran dedicados a dicha tarea, entre ellos podemos mencionar: The Inference Group at Cavendish Laboratory, Cambridge (D. McKay), The California-Harvard Astrostatistics Collaboration (X-ray statistics), Center for Astrostatistics at Penn State University (statistical computing package R), Microsoft Research's Science Group (Jim Gray), The DISL at University of Illinois at Urbana, Alex Szalay group at Department of Physics and Astronomy at Johns Hopkins University (SkyServer, CASJobs) y los grupos relacionados con VO nacionales.

5. Algunas reflexiones personales

Si (ad)miramos el panorama de proyectos observacionales el problema del manejo de datos toma una adecuada dimensión. Tanto los futuros satélites astronómicos previstos para los próximos años: GLAST (2007), Planck (2008), Herschel (2008), WISE (2009), GAIA (2011), James Webb Space Telescope (NGST, 2013), SNAP, DUNE, CMBPOL, como los futuros telescopios operando en el óptico/IR cercano: de 8m: Large Synoptic Survey Telescope (LSST, 2013), 11m: Gran Telescopio Canarias (GTC, 2009), 12m: Large Binocular Telescope (LBT, 2008), 20m: Giant Magellan Telescope (GMT, ~2015), 30m: Thirty Meter Telescope (TMT, ~2015), Giant Segmented Mirror Telescope (GSMT), Extremely Large Telescope (ELT, ~2015), Overwhelmingly Large Telescope y mm/sub-mm 50x10m: ALMA (2012), SKA (2020) proveerán un sinfín de datos observacionales.

Un párrafo aparte merecen los grandes relevamientos digitales, proyectos en curso como: 6dF GRS, Dark Energy Survey, Southern Sky Survey y Pan-STARRS elevarán la tasa de adquisición de datos a varios TB por noche de observación. Cabe preguntarse si resultará práctico el almacenamiento de todos los datos adquiridos o pasaremos a esquemas donde las técnicas de software extraerán la información importante de las imágenes que será finalmente almacenada. Uno de los proyectos más ambiciosos en desarrollo es el Large Synoptic Telescope a ser instalado en Chile con una tasa de 15 TB por noche, lo que implica una tasa anual de 7 PB.

Los datos anteriores indican que las bases de datos en astronomía continuarán resultando sumamente útiles. La implementación de bibliotecas que extiendan la funcionalidad de SQL es necesaria y la posibilidad de integrar SQL queries en software estadísticos permitirá una mejor interacción con los grandes repositorios de datos existentes y futuros. Existen además interesantes desafíos estadísticos en eScience (desarrollo de algoritmos, implementación y aplicación a nuevos problemas) tales como: reconocimiento de patrones, clasificaciones automáticas, métodos de compresión de datos y separación señal-ruido.

Como usuario uno debiera interesarse por averiguar como publicar sus datos de modo que el experimento, observación o teoría sea reproducible más tarde. En la interesante interface teórica-experimental *hoy* se pueden comparar y estudiar por ejemplo:

- diagramas de color magnitud de cúmulos globulares observados vs. simulados (Zurek),
- catálogos de galaxias semi-analíticas (De Lucia, Bower) vs. observados (SDSS, 2dF),

- observaciones sintéticas de cúmulos de galaxias (Springer, Tormen) vs observaciones XMM/Chandra (Bohringer, Schuecker),
- simulaciones de colisiones/fusiones de galaxias (Steinmetz) vs. observaciones (HST, COSMOS),
- simulaciones de Lyman Alpha Forest (Nusser),
- simulaciones del CMB observado con Planck con topologías no triviales (Banday),

mediante la minería de los repositorios de estos datos, de una manera bastante más automática que la habitual. Los observatorios virtuales hoy son una realidad y la implementación de servicios de análisis como cómputo de correlaciones, búsquedas de cúmulos y test de independencia de hipótesis son un ejemplo real de eScience y hay mucha gente trabajando en ello. Un número de VO nacionales establecido una vibrante alianza de ellos (IVOA). Este fenómeno se repite en otras disciplinas como por ejemplo: física de partículas y medicina-genética entre otras. La Internacional Virtual Observatory Alliance se encarga en el caso astronómico de establecer los patrones y estándares que deben respetar sus VO miembros.

Referencias

- Bell, G. et al. 2007, arXiv:cs/0701165
Gray, J. et al. 2007, arXiv:cs/0701172
Moore, A. et al. 2001, arXiv:astro-ph/0012333
Norris, R. 2007, arXiv:astro-ph/0701361
Singh, V. et al. 2007, arXiv:cs/0701173
Szalay, A. et al. 2007, arXiv:cs/0701164
Szapudi, I. et al. 2001, arXiv:astro-ph/0107383

INFORME INVITADO – INVITED REVIEW

Ciencia teórica: entre la necesidad lógica y la contingencia

Andrea Costa

*Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE), Córdoba
Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires*

Resumen. *La física constituye un sistema lógico de pensamiento en estado de evolución, cuyas bases no pueden ser obtenidas de la experiencia en forma inductiva... Es este el gran objetivo de toda teoría, hacer de estos elementos irreductibles (axiomas / principios) lo más sencillo y reducidos en número como sea posible, sin tener que renunciar a la adecuada representación de ningún contenido empírico (Albert Einstein).*

Concebir la lógica como revelación de la estructura del ser verdadero es la máxima ilusión metafísica (Massimo Cacciari).

1. Introducción

¿Qué tipo de ciencia teórica es la astronomía? En la antigüedad clásica y en la edad media no había dudas: en el orden clasificatorio de las ciencias ella pertenecía al reino de las matemáticas. Su rigor y exactitud la acercaban a la metafísica o ciencia por excelencia – ciencia de la totalidad, ciencia de Dios –, a la que se accedía por contemplación, aunque, sin duda, no por contemplación empírica. Para ello había que cumplir una serie de requisitos de orden filosófico que trascendían lo meramente intelectual y resultaban en la adquisición de capacidad para la búsqueda tanto de la verdad como de la bondad y la belleza, consideradas atributos indisolubles. Claro, hoy estamos lejos de entender de este modo a una ciencia como la astronomía. No dudaríamos en decir que lo que la identifica es su carácter empírico. Sin embargo, y a pesar de los siglos, hay aspectos en la forma de concebir a las ciencias fácticas que delatan y conservan los orígenes platónicos con los que se las entendieron entonces. Para dar cuenta de ello hay que hacer un poco de historia de la filosofía.

2. Necesidad lógica vs. contingencia

Las ciencias fácticas suponen que hay un orden dado en el mundo. Pero este supuesto deja sin responder la pregunta por la naturaleza de dicho orden. ¿Qué es lo definitorio de estas ciencias: el que tengan una base empírica o que obedezcan a leyes matemáticas? Se podría contestar que los dos aspectos son determinantes; sin embargo lo empírico presupone cierta contingencia y lo matemático, la necesidad lógica. Y estas dos cuestiones opuestas están en tensión; ciencias que a la vez son empíricas y necesarias; contingentes y necesarias.

Es que sólo la idea de contingencia admite un tiempo significativo, un tiempo no indiferente ante el futuro y el pasado, signo de lo inesperado, de lo que puede ser y podría no haber sido. En cambio, la necesidad impone un orden lógico a la

vez que se instituye en la explicación misma. De modo que lo que se aparta de ella es lo inexplicable, lo que debe ser reconducido a la ley. Este es el imperativo de la búsqueda de las ciencias en general, reducir el espacio de lo que puede ser o no ser, conjurar la contingencia.

Si ante tal tensión nos imponemos una definición y nos inclinamos a pensar que la imprecisión del dato empírico se debe a una limitación histórica de nuestra capacidad, evitable con el tiempo, opinaremos por ejemplo, como muchos físicos, que la física teórica es indiscernible de la geometría (Bunge 1978). Dentro de esta ciencia, la termodinámica y la cuántica ofrecen cierta resistencia a su inclusión dentro de la legalidad determinista para la que el tiempo es un mero parámetro. La termodinámica por el carácter irreversible del tiempo y la cuántica porque sus leyes son intrínsecamente probabilísticas, no interpretables por ignorancia. Se insiste entonces, en la búsqueda de estrategias de inclusión específicas en el orden lógico-matemático. Se trata de descubrir, al menos en la forma de iteraciones sucesivas, las leyes cuya naturaleza última es matemática; y es así como nos reencontramos con las huellas de Platón.

Sin embargo, para otros, quizá poetas o delirantes, esta solución resulta irritante. ¿Cómo entender entonces, lo irreductible e incommensurable de la historia y la vida? ¿son ellas puro simulacro? Pero, aun si no estamos dispuestos a admitir esto último y afirmamos la irreductibilidad e incommensurabilidad de la contingencia, nos asalta otra pregunta. ¿De dónde proviene la importancia y el lugar privilegiado, metahistórico, que tiene la lógica? Dado que la no contradicción es un principio no resignable ¿supone esto algo respecto a la estructura del mundo?, y si esto no es así, si la estructura del mundo no se corresponde con el orden lógico-matemático, ¿por qué nos causa horror la contradicción, por qué ella resulta irresignable?

Un recuento histórico-filosófico – sin pretensión de exhaustividad – nos muestra cómo esta tensión tiene adeptos calificados en diferentes momentos históricos, tanto en las ciencias como en la filosofía. Aunque la visión platónica que legó un lugar privilegiado para la matemática como estructura última del mundo haya encontrado escollos y resistencias a lo largo del tiempo, hubo también una enorme dificultad filosófica para evitar la paradoja del dualismo que mencionáramos.

3. Recuento histórico

3.1. Dialécticos y fideístas

En la edad media la discusión sobre la contingencia y el determinismo se presentó en los términos del alcance del poder de dios (entendido como representación trascendente o inmanente – según de qué filósofo se trate – de la totalidad) respecto al de la matemática y la lógica. Un ejemplo paradigmático se presenta en el siglo XI. El terreno de disputa filosófica más notorio giraba precisamente alrededor de la preeminencia relativa entre las cuestiones de fe y las de la lógica. La pretensión de someter el dogma y la revelación misma a las exigencias de la deducción silogística conduciría a los dialécticos a conclusiones que suscitarían la reacción violenta de los teólogos uno de cuyos mayores exponentes fue Pedro Damiano.

Para Pedro Damiano – que se lamentaba de que el contenido de sus cartas despertaran menos interés que la elocuencia y sutileza de su dialéctica – la filosofía era

una invención del diablo. Sólo el diablo pudo haber enseñado, con la gramática, a declinar “Deus” en plural. Las enseñanzas de Platón, Pitágoras y Euclides eran despreciables dado que para la búsqueda de la salvación, lo única tarea digna de esta vida, bastaba con la breve biblioteca que contuviera el Antiguo y el Nuevo Testamento junto con algunos comentarios alegóricos de diferentes santos sobre las Escrituras. Si la filosofía hubiese sido necesaria para la salvación de los hombres Dios hubiese enviado filósofos para convertirlos (Gilson 1985).

Si bien Pedro Damiano fue la figura paradigmática de la visión convencional que de la Edad Media se tiene, su fama provino del ejercicio efectivo que hizo de la dialéctica (o de la lógica para usar un término más actual), en contra de la misma dialéctica y en defensa de la fe. En las conversaciones de sobremesa con San Jerónimo éste sostenía que Dios puede hacerlo todo pero no puede hacer que lo que sucedió no haya sucedido. Contra él Damiano asegura que la voluntad de Dios es la única causa de la existencia de lo que es. No introduzcamos en Dios las reglas del discurso ni las leyes de la dialéctica porque las necesidades lógicas de nuestras conclusiones no valen para él. Dios puede hacer que Roma no haya existido dado que vive en un eterno presente y está por tanto fuera de las condiciones donde estos problemas se plantean, para él no hay pasado ni futuro. Su poder es infinito y trasciende las determinaciones que las leyes de la lógica nos imponen a nosotros los humanos seres finitos poseedores de un cuerpo que no es más que mera masa de podredumbre, polvo y ceniza.

El argumento ontológico de Anselmo de Canterbury – la “demostración de la existencia de dios” más famosa de la historia de la filosofía ha sido revisitada y reformulada en diferentes versiones, y recibido la atención de los filósofos posteriores hasta nuestros tiempos – es ejemplo de los esfuerzos por evitar el recurrir a la empiria, es decir, de obtener una demostración de una vez y para siempre, eludiendo la contingencia que puede deparar el transcurso del tiempo (García Morente 1979).

3.2. Renacimiento

Nicolás de Cusa fue uno de los principales representantes de la transición filosófica entre la Edad Media y el Renacimiento; continuador de la tradición medieval neoplatónica y mística de Erigena y Eckart. Entre sus obras más importantes se destaca *La docta ignorancia* (de Cusa 1966). Para Cusa el entendimiento y la razón son diferentes. Las reglas de la lógica, y fundamentalmente el principio de no contradicción, rigen sólo al entendimiento que es propio de lo humano. La razón, en cambio, no se ciñe a estas reglas. Ella es divina, es el principio de la vida espiritual, y la última y radical unidad (Dios) de la que emana lo múltiple. En el primer libro de *La docta ignorancia*, Dios es presentado como el máximo, la plenitud a la que nada falta. En él coincide todo lo que fuera de él es pensado como distinto por nuestro entendimiento. Los contrarios se concilian en el infinito, en Dios coinciden los opuestos. Vemos que para Nicolás de Cusa no hay medida para dios, la inconmensurabilidad le es propia, y es él, en cambio, quien impone la medida a los hombres quienes deben someterse al principio de no contradicción. El signo más claro de finitud de los hombres es precisamente la variabilidad, mutabilidad, temporalidad. Dios es el uno inmutable y lo no divino es como la cantidad, que siempre admite aumento y disminución.

3.3. El problema visto por la modernidad: la ciencia de la revolución científica

En la edad moderna el problema de la contingencia y la necesidad se plantea en los mismos términos (respecto a Dios) pero fundamentalmente es la pregunta sobre la naturaleza la que importa: ¿conlleva ella, en última instancia, un orden racional matemático? Spinoza escribe su *Ética* (Spinoza 1999) utilizando la “razón geométrica” (la razón que es capaz de un conocimiento ilimitado mientras se ciña con rigor lógico al método geométrico). Y es esta la discusión entre empiristas y racionalistas. Para los racionalistas como Leibniz toda la estructura del mundo tiene necesidad matemática, es analítica. Si el mundo se nos aparece como contingente (lo que puede ser o no ser) es un problema de la limitación de nuestro entendimiento. Dios mismo es un dios lógico que se somete a ella. Recurriendo a Leibniz (Leibniz 1991a) es posible sentir el peso del dilema al que nos obliga la férrea oposición entre contingencia y necesidad.

Quien cree en una verdad subsistente más allá de todo sujeto, abstraída de todo tiempo, lugar y circunstancia, cree en Dios. Dios no debe demostrarse, ya que está en la base de todas las demostraciones: es la verdad misma. Si algo puede demostrarse, entonces Dios existe. Dios, pues, es accesible a cualquier ser racional. No es necesaria ninguna revelación particular para conocer su existencia. Dios es la precondition de todo aprendizaje lógico.

Si la verdad fuera el consenso, algo podría ser verdadero y falso al mismo tiempo, según dos grupos de opinión distintos. Todo lo cual es absurdo. En consecuencia, la verdad sólo puede definirse de un modo: como no contradicción.

Según Leibniz, las verdades de razón (las que se captan por mero análisis de los términos de una proposición: *La recta es la línea más corta entre dos puntos*) son las que respetan el principio de no-contradicción y se fundamentan en el entendimiento divino, y las verdades de hecho (las que se captan por experiencia o estudio e investigación: *Los visigodos invadieron la Península*) no se conocen por análisis del término “visigodo” o de “Península” y se fundamentan en el principio de razón suficiente: todo lo que existe o sucede debe tener una razón para existir o acaecer. Bastaría conocer las razones del expansionismo visigodo para deducir que invadirían la Península dado que en la voluntad divina, que ha decidido crear un mundo con objetos tales como los visigodos y la Península. La razón para que Dios creara este mundo y no otro diferente es que este es el mejor de todos los mundos posibles, y eso explica su creación. Luego ni el mismo Dios sería libre para crear un mundo distinto de éste.

Las verdades de hecho se reducen en última instancia a las de razón o analíticas, entre ellas hay una diferencia de grado. Sin embargo, Leibniz argumenta que para constatar el carácter deductivo de las verdades de hecho el entendimiento humano tendría que realizar un análisis infinito, por ejemplo del término “visigodo”, de modo que sólo por experiencia terminaríamos sabiendo lo que harán los godos. Pero además, las verdades de razón se refieren a esencias – son verdaderas independientemente de que existan o no los objetos a los que refieren: los tres ángulos de un triángulo suman dos rectos, existan o no triángulos –, mientras que las verdades de hecho se refieren a existencias – sólo son verdaderas si existen los objetos referidos por ellas –. Así, Leibniz afirma que la verdad del hombre es una ficción mudable, o, como mucho, una anticipación de la verdad absoluta (Leibniz, G. 1991b).

En el polo opuesto encontramos a Hume, quien reivindica la contingencia radical con lo que desaparece el carácter necesario de la lógica y la matemática (Hume 1997). Sin embargo, aunque para los empiristas como Hume el contenido de nuestras ideas proviene del dato empírico y no hay necesidad alguna, sólo costumbre y hábito, es este el marco, el de la revolución científica del siglo XVII, donde se instituye el pensamiento secularizado con una confianza ilimitada en la capacidad de la razón humana – en tanto razón geométrica – por medio de la cual se accede al conocimiento del orden del mundo.

Con Kant, quien admite que Hume lo despertó de su sueño dogmático, por vez primera aparece la posibilidad de una síntesis integradora de estas perspectivas opuestas: el racionalismo y el empirismo. A su vez la mecánica newtoniana se consagra filosóficamente como verdadera ciencia y la física llega ser la ciencia moderna que hoy conocemos.

Kant se pregunta por el origen de las ideas matemáticas y lógicas. Si ellas fueran empíricas serían mutables, contingentes; en cambio, si proceden de nuestro intelecto con independencia de la experiencia empírica habría que dar cuenta del por qué ellas se ajustan tan perfectamente a lo que se quiere describir. Su respuesta es que no es el mundo sino la estructura del yo humano lo que impone la necesidad lógica. Los objetos del mundo se le dan al yo en tanto fenómenos sin que haya acceso directo a los mismos. Es decir, tenemos una estructura de nuestra sensibilidad y nuestro entendimiento que anteponemos a la experiencia. Hay dos intuiciones puras o sentidos: un sentido interno al que se le asocia el tiempo y uno externo asociado al espacio. Estas intuiciones son anteriores a cualquier experiencia, dado que son ellas sus condiciones de posibilidad. Si no las tuviéramos no habría posibilidad de experiencia alguna. No podríamos diferenciarnos del entorno ni distinguir el atrás y adelante dado que antes de ello requerimos la intuición del tiempo y el espacio. Para contar necesitamos diferenciar dos percepciones diferentes entre sí: para esto necesitamos el tiempo. Y para diferenciar un objeto de otro dados a nuestra conciencia necesitamos reidentificarlos en el tiempo y para esto necesitamos el espacio. La matemática y la geometría se fundan en la estructura de estas intuiciones, que son condiciones de posibilidad de la experiencia. La matemática se corresponde con el sentido del tiempo y la geometría con el del espacio, y es por ello que nos resultan necesarias y universales. Lo que funda las matemáticas son las formas a priori -anteriores a la experiencia y por tanto independientes de ella-. Es por tanto para Kant la estructura del yo humano la que impone la necesidad lógica y la causalidad a los objetos (Kant 2000).

4. Una síntesis contemporánea: el lugar determinante de la historia y la singularidad de la lógica y la matemática

Y aunque con Kant la posibilidad de la síntesis se hace posible, los comienzos del siglo XX, mediando la intervención de Schopenhauer (2004), muestran la reedición de las discusiones – entre logicistas¹ (Whitehead & Russell 1903),

¹Con el logicismo, sobre todo con el desarrollo de los *Principia Matemática*, se inicia el desarrollo moderno de la lógica, esto es, de la ciencia tradicionalmente vista como el prototipo de lo “a

formalistas (Hilbert 1999) e intuicionistas (Schmitz 1988) – acerca del carácter omnipotente de la matemática y su relación con la empiria.

Para Russell y Frege, los fundadores del logicismo, es posible reconstruir la lógica sobre una base axiomática estricta de conceptos y proposiciones a las que atribuyen una referencia objetiva y fundamentable. Por su parte, Hilbert, el fundador del formalismo lleva a cabo una axiomatización completa de la matemática, a la que supuso creaciones formales y arbitrarias, poniendo el acento en el aspecto operativo y funcional y dejando totalmente de lado el contenido interpretativo. En oposición al logicismo, para Hilbert las proposiciones matemáticas no tienen contenido cognitivo con independencia del signo, la regla y las fórmulas que permiten operar. En tercer lugar, Brouwer, el principal exponente del intuicionismo, hace de la actividad intelectual implicada en el proceso de prueba el factor determinante. De este modo, el énfasis se coloca en los argumentos constructivos utilizados en los procedimientos efectivos de la matemática. La demostración matemática es para los intuicionistas una construcción intuitiva y no formal realizada mediante la introspección. De modo que el objeto de la matemática es el registro *postfactum* de los principios de razonamiento empleados en la construcción matemática. La matemática es actividad constructiva en el medio de una intuición interna, básica, independiente de la lógica y el lenguaje.

Con el estructuralismo lingüístico de Saussure (Saussure 1916) comienza a abandonarse el modelo representacional del lenguaje, según el cual la estructura del idioma refleja la estructura del pensamiento entendida como la lógica y comienza a entenderse como “a priori histórico” en el sentido de estar antes de la conciencia constituyéndola. Sin embargo, son los planteos wittgenstenianos (Wittgenstein 1988) los que, a mi juicio, ponen luz nueva a la forma de entender la tensión entre necesidad y contingencia. En ellos se ubica a la historia, entendida en tanto praxis colectiva, en el lugar determinante sin que por ello la lógica y la matemática dejen de tener un lugar singular. Tal tensión es expresada de un modo provocador y paradójico en los términos del “a priori contingente”. Con ello se pone en cuestión las notas de “universalidad” y en especial de “necesidad” que se incluyen en la definición misma del término “a priori” indicando que las proposiciones que funcionan como leyes en el corpus de las distintas ciencias no se relacionan con el mundo de acuerdo al modo de la descripción sino al de la prescripción². Es decir que no se les puede aplicar los predicados de verdadero o falso, en tanto no establecen relación representativa con hecho alguno. Las leyes científicas son condición de posibilidad de la experiencia y de los hechos de la experiencia. Son “antes” de toda descripción. Lógicamente independientes de las descripciones efectivas, se perfilan como el marco normativo que hace posible su formación y expresión. La lógica como condición de posibilidad del mundo requiere de las leyes científicas para que el mundo adquiriera el orden y la coherencia que le otorga el hecho de poder ser reducido a un sistema único de representación. De modo que al ser las leyes científicas formas o esquemas que dan cuenta de regularidades forman parte del orden lógico, o mejor aún lingüístico, sin embargo, no representan regularidades en el comportamiento de los objetos

priori” (independiente de la experiencia) y considerada por muchos (como por ejemplo Kant) como acabada en la forma que hace 2000 años le dio Aristóteles.

²aforismo 6, *Tractatus Lógico-Philosophicus*, Alianza, Madrid, 1979

sino regularidades en nuestro uso del lenguaje, uso que debe entenderse en tanto praxis colectiva, social e histórica. Son a priori porque en tanto marco común de una comunidad de lenguaje siempre nos preceden, pero son contingentes dado que se sustentan en el factum de nuestra práctica lingüística.

Y es en este sentido que para Wittgenstein debe entenderse el principio de no contradicción. Como regla pragmática necesaria, su necesidad reside en que -en tanto regla internalizada y colectiva- no sabemos como proceder si no la seguimos. Es que guiando nuestras praxis por una lógica matemática implacable ha sido posible establecer la fijeza compartida y colectiva de nuestras percepciones sensibles. Y la noción de sinsentido wittgensteniana -aquello de lo que no se puede hablar- indica el abismo en que nos sume la mera posibilidad de violar los límites del lenguaje en tanto intento de ir más allá de lo representable: “sólo lo que se puede describir también puede ocurrir” dice Wittgenstein en la proposición 6.362 (TLP).

En el cuento “Tigres azules” Borges (1997) hace un recorrido implícito por la filosofía de la matemática wittgensteniana poniendo de manifiesto la noción de sin sentido en una bella metáfora en la que los hombres sienten horror ante lo imposible, inimaginable: lo irrepresentable. Siguiendo a Wittgenstein, la metáfora borgeana entiende el abismo irrepresentable como el momento en el que deja de haber ley y orden, la matemática se vuelve incierta y no es posible contar, porque nuestro mundo ya no se ciñe a lo que se organiza por medio de la matemática. Unas piedras mágicas se reproducen sin cesar y pierden individualidad multiplicándose hasta el infinito haciendo que se pierda el sentido tanto de contarlas como de nombrarlas. Finalmente hay una posibilidad de escapar al horror; es posible que las monstruosas piedras que engendran desaparezcan. Un mendigo las requiere como limosna y al ser advertido sobre lo espantoso de la limosna que recibirá estás son sus palabras finales “No sé aun cual es tu limosna pero la mía es espantosa. Te quedas con los días, las noches, con la cordura, con los hábitos, con el mundo”.

Referencias

- Borges, J. L. 1997, Tigres Azules, en “La Memoria de Shakespeare.” Obras Completas V III, Emecé, Bs. As.
- Bunge, M. A. 1978, Filosofía de la Física, Editorial Ariel
- de Cusa, N., 1966, La Docta Ignorancia, Aguilar, Buenos Aires
- García Morente, N. 1979, Lecciones Preliminares de Filosofía, Porrúa, México
- Gilson, E. 1985, Historia de la Filosofía Medieval, Gredos
- Hilbert, D. 1999, Geometry and Imagination, American Mathematical Society
- Hume, D. 1997, Investigación sobre el Entendimiento Humano, Alianza, Madrid
- Kant, I. 2000, Crítica de la Razón Pura, Porrúa, México
- Leibniz, G. 1991a, Discurso de Metafísica, Porrúa, México
- Leibniz, G. 1991b, Monadología, Porrúa, México
- Saussure, F. 1916, Curso de Lingüística General, Obra Póstuma, Gedisa, Madrid
- Schmitz, 1988, Wittgenstein, la Phylosophie et les Mathematiques, PUF, Paris
- Schopenhauer, A. 2004, El mundo como Voluntad y Representación, Trotta

Spinoza, B. 1999, *Ética*, Alianza, Madrid

Whitehead, A., & Russell, B., 1903, *Principia Mathematica*, Cambridge University Press

Wittgenstein, L. 1988, *Observaciones a los Fundamentos de la Matemática*, Alianza, Madrid

Estructura orbital regular y caótica en sistemas estelares triaxiales

J. C. Muzzio^{1,2}

(1) *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP*

(2) *Instituto de Astrofísica de La Plata - UNLP y CONICET*

Abstract. A simple way to obtain self-consistent models of triaxial stellar systems is to follow with an N-body code the collapse of an initial distribution of mass points. To determine the orbital structure of the triaxial systems so obtained one has to resort to codes of different kinds: 1) N-body codes to build up the systems that will be studied; 2) Fit the system's potential with smooth and constant formulae; 3) Separate regular from chaotic orbits and, within the latter, recognize partially and fully chaotic ones; 4) Classify the regular orbits through frequency analysis. Here we present a description of the codes we have been using for that purpose, as well as some of the results we have recently obtained with them. We give a brief description of the cluster of parallel processors that has begun to operate at La Plata and its possible expansion in the foreseeable future, as well as some examples of its computing speed with those codes.

Resumen. Una forma simple de obtener modelos autoconsistentes de sistemas estelares triaxiales consiste en seguir con un programa de N-cuerpos el colapso de una distribución inicial de puntos masa. La determinación de la estructura orbital de los sistemas triaxiales así obtenidos involucra la utilización de programas computacionales de distintos tipos: 1) Programas de N-cuerpos para crear los sistemas a estudiar; 2) Ajuste del potencial del sistema en equilibrio con expresiones analíticas continuas en el espacio y constantes en el tiempo; 3) Separación de las órbitas regulares y caóticas y, dentro de las segundas, de las parcial y totalmente caóticas; 4) Clasificación de las órbitas regulares mediante análisis de frecuencias. Presentamos aquí una descripción de los programas que hemos estado utilizando, así como algunos resultados obtenidos con ellos recientemente. Damos una breve descripción del sistema de procesadores en paralelo que ha comenzado a funcionar en La Plata y de su expansión prevista, así como algunos ejemplos de su velocidad de procesamiento con los programas citados.

1. Introducción

Es relativamente sencillo obtener modelos autoconsistentes de sistemas estelares esféricos (Schuster o Plummer, King) o de disco (Mestel, Kalnajs), pero es mucho más difícil el caso de los sistemas triaxiales. El método más popular para obtener éstos es, probablemente el de Schwarzschild (1979): 1) Se elige una dis-

tribución de masa; 2) Se determina el potencial correspondiente; 3) Se crea una biblioteca de órbitas en ese potencial, seleccionando las condiciones iniciales a fin de tener una muestra completamente representativa de las órbitas posibles; 4) Se calcula el porcentaje de cada tipo de órbitas que es necesario tener para que la distribución de masa sea la inicial.

Sin embargo, en los últimos años está adquiriendo importancia otro método que, históricamente, fue el primero que permitió obtener modelos de sistemas triaxiales: 1) Se crea el sistema siguiendo con un programa de N-cuerpos el colapso de una distribución, originalmente fuera de equilibrio, hasta que se alcanza éste; 2) Se aproxima el potencial con una fórmula interpolatoria adecuada; 3) Se elige una muestra representativa de los cuerpos y sus posiciones y velocidades se toman como condiciones iniciales para el cálculo de órbitas; 4) Mediante algún indicador de caoticidad, se separan las órbitas regulares de las caóticas y, entre las últimas, se distinguen las parciales de las totalmente caóticas; 5) Se clasifican las órbitas regulares, por ejemplo, mediante análisis de frecuencias.

Conviene mirar a estos dos métodos como complementarios: el primero permite la selección inicial del sistema que se va a analizar, en tanto que en el segundo uno obtiene el sistema que sale del experimento de N-cuerpos; inversamente, aunque no es una condición obligada, en el método de Schwarzschild se tiende a usar distribuciones de densidad relativamente simples para evitar expresiones complicadas del potencial, limitación que no se presenta en el método de N-cuerpos. Por ejemplo, todos los sistemas estudiados con el método de Schwarzschild tienen relaciones de semiejes constantes del centro al borde del sistema, característica poco realista que no se da en los modelos del segundo método y que, como nosotros mostramos (Muzzio et al. 2005), dificulta la inclusión de porcentajes elevados de órbitas caóticas en el primer método.

En resumen, nosotros encontramos que en este tema había un “nicho” que valía la pena explorar ya que, por un lado, todavía hay pocos sistemas investigados con el método de N-cuerpos y, por otro lado, se pueden hacer aportes significativos con equipos de computación como los que tenemos a nuestra disposición.

2. Modelos triaxiales autoconsistentes

2.1. Generación del sistema a estudiar

El método que usamos hasta ahora ha sido, simplemente, dejar colapsar una distribución esférica de partículas: si su energía cinética inicial es baja, las órbitas son predominantemente radiales y la inestabilidad de las mismas lleva al sistema a una forma triaxial. A mayor energía cinética, menor achatamiento y triaxialidad.

El programa necesario para esta etapa es uno de N-cuerpos y, como las interacciones entre partículas deben ser despreciables, los programas multipolares son muy convenientes. Venimos usando con éxito el de White (1983) implementado por L.A. Aguilar (ver Aguilar y Merritt 1990) pero: 1) Sólo llega al octupolo y, de hecho, nosotros no pasamos del cuadrupolo; 2) Las fórmulas interpolatorias para el potencial hay que elegirlas por separado, ya que no usa funciones para los desarrollos en serie.

Estamos empezando a emplear el programa de Hernquist y Ostriker (1992) que permite desarrollos hasta cualquier orden multipolar y que provee expresiones matemáticas para el potencial. Sus inconvenientes son que utiliza una familia particular de funciones ortogonales (derivadas del potencial de Hernquist) y que los desarrollos matemáticos para, por ejemplo, obtener las ecuaciones variacionales, son largos y trabajosos.

No hay problema alguno en utilizar otros modelos de partida. Sería particularmente interesante tomar los que salen de los trabajos sobre formación de galaxias, pero deben ser relativamente detallados (al menos, unas 100.000 partículas por galaxia y, si son 1.000.000, tanto mejor).

2.2. Ajuste del potencial

Con el programa de Aguilar, hay que buscar fórmulas interpolatorias, pero el de Hernquist y Ostriker ya da las expresiones necesarias. Como el caos depende mucho de las características del potencial, distintas fórmulas (que proveen ajustes igualmente buenos) pueden dar distintas fracciones de órbitas caóticas, pero las fracciones de distintos tipos de órbitas regulares, en cambio, no se modifican significativamente (Carpintero y Wachlin 2006).

3. Separación de órbitas caóticas y regulares

Hay distintos indicadores de caos que se han usado en dinámica galáctica y, a título de ejemplo y sin pretender ser exhaustivos ni en los métodos ni en las citas de quienes los han empleado, podemos mencionar los siguientes: exponentes de Lyapunov (Merritt y Fridman 1996; Muzzio et al. 2005), índices de alineación (Kalapotharakos y Voglis 2005), variabilidad de frecuencias orbitales (Valluri y Merritt 1998; Holley-Bockelmann et al. 2002) y MEGNO (Cincotta y Simó 2000).

Nosotros utilizamos la subrutina LIAMAG, debida a Udry y Pfenniger (1988), que permite obtener los seis exponentes de Lyapunov y, con ellos, distinguir entre órbitas total y parcialmente caóticas: las primeras tienen dos exponentes positivos y las segundas sólo uno, por lo que obedecen una pseudo-integral adicional. La Figura 4 de Muzzio et al. (2005) muestra a las órbitas parcialmente caóticas con una distribución más próxima a la de las regulares que a la de las totalmente caóticas. Ese ejemplo corresponde a un modelo fuertemente triaxial y las órbitas parcialmente caóticas (que representan aquí el 8.9% de todas las órbitas del sistema, contra el 43.8% de las totalmente caóticas) seguramente obedecen a pseudo-integrales locales. Sin embargo, en un modelo muy próximo a la simetría rotacional que estudiamos recientemente (Aquilano et al. 2007) esos porcentajes son de 19.1% y 16.3%, respectivamente, y es muy probable que en este caso la pseudo-integral esté emparentada con la componente del momento angular paralela al “casi eje de simetría”, teniendo un carácter más global.

La Figura 1 muestra dos órbitas parcialmente caóticas y una regular del modelo de Muzzio et al. (2005); las curvas cerradas muestran los límites impuestos por la conservación de la energía, en tanto que los ejes x, y y z corresponden, respectivamente, a los ejes mayor, intermedio y menor del sistema triaxial. Como puede apreciarse de la figura, excepción hecha de que las órbitas parcialmente

caóticas tienen límites algo menos nítidos que los de la regular, no hay diferencias significativas entre unas y otra.

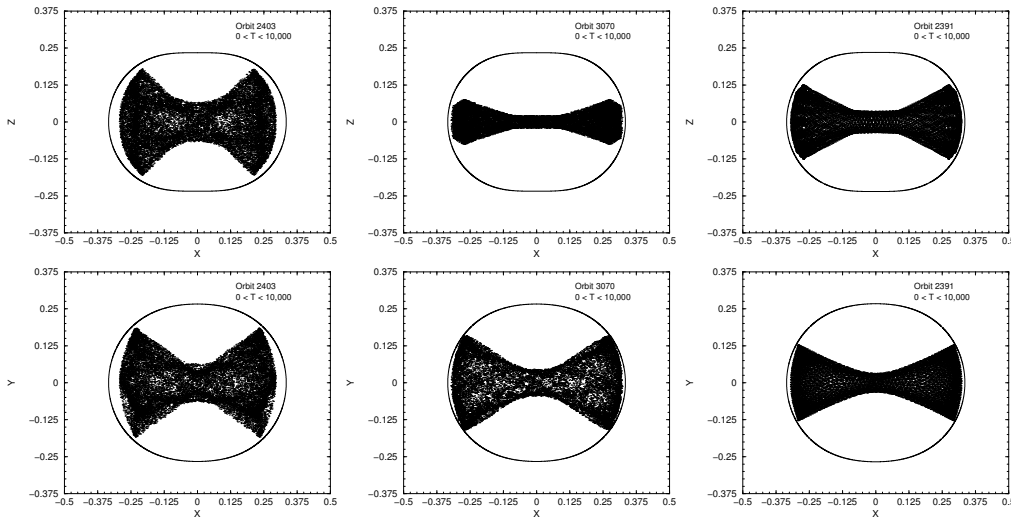


Figura 1. *Izquierda y centro: Órbitas parcialmente caóticas. Derecha: Órbita regular.*

Es importante destacar que una órbita caótica puede, durante cierto tiempo, recorrer zonas del espacio de las fases próximas a las ocupadas por órbitas regulares y, durante ese tiempo, comportarse en forma similar a esas órbitas regulares. Los exponentes de Lyapunov calculados numéricamente sobre esos intervalos de tiempo (no sobre tiempo infinito, como los teóricos), reflejan este hecho: valores altos cuando la órbita se comporta más caóticamente y bajos cuando su comportamiento se asemeja al regular. Las Figuras 2 y 3, también correspondientes a órbitas del sistema estudiado por Muzzio et al. (2005) son buenos ejemplos de este fenómeno. Una consecuencia de esto es que, si separamos las órbitas totalmente caóticas según que tengan valores bajos o altos de los exponentes de Lyapunov, también resultan tener diferente distribución espacial, como muestra la Figura 5 de Muzzio et al. (2005).

Esto es lo que hace que no haya problema en acomodar porcentajes elevados de órbitas caóticas con el método de N-cuerpos: hay un reservorio casi esférico del que, con el tiempo, saldrán órbitas que darán una distribución más triaxial cuando las que tenían esta última forma pasen a dar una más esférica. Como en el método de Schwarzschild, por comodidad matemática (no es algo que imponga ese método), se usan modelos con relaciones de semiejes constantes, se carece de ese reservorio casi esférico. Entonces, cuando las órbitas caóticas que ocupaban regiones achatadas pasan a cubrir otras más esféricas, no hay de donde sacar otras que las reemplacen. De ahí la dificultad para acomodar porcentajes elevados de órbitas caóticas en ese método, en tanto que en el de N-cuerpos se acomodan naturalmente.

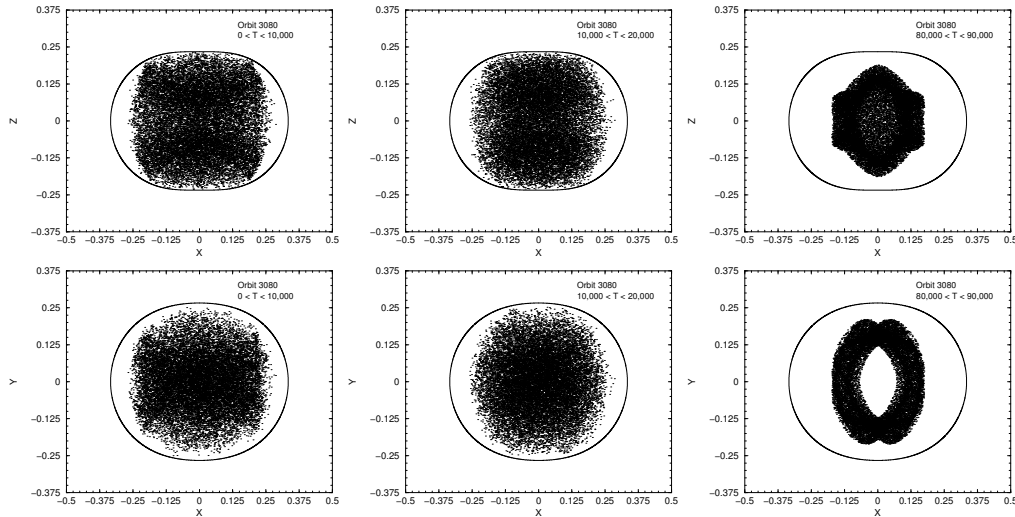


Figura 2. Órbita totalmente caótica que, durante cierto tiempo se comporta como tal y luego imita a una órbita regular. Los exponentes de Lyapunov calculados sobre los mismos intervalos de tiempo de las figuras son, de izquierda a derecha: 0.3340, 0.4175 y 0.0051.

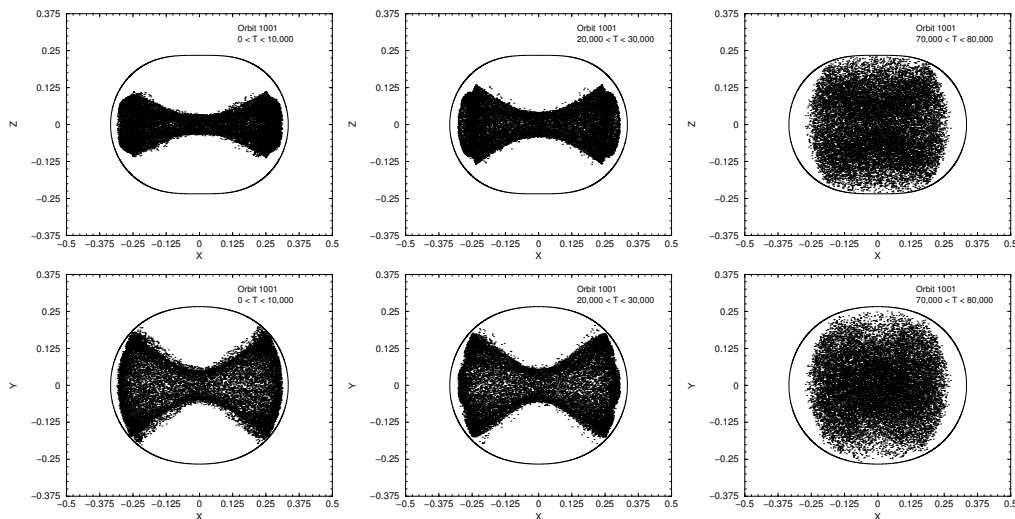


Figura 3. Órbita totalmente caótica que, durante cierto tiempo imita a una órbita regular y luego muestra su carácter caótico. Los exponentes de Lyapunov calculados sobre los mismos intervalos de tiempo de las figuras son, de izquierda a derecha: 0.0287, 0.0287 y 0.3114.

4. Clasificación de órbitas regulares

Los métodos preferidos por la mayoría de los autores se basan en el análisis de las frecuencias orbitales. Hay diferentes programas disponibles para obtener dichas

frecuencias y nosotros usamos el de Šidlichovský y Nesvorný (1997). Lo más habitual es trabajar en forma compleja, con las coordenadas como la parte real y las velocidades como la imaginaria. La mayoría de los autores (e.g., Wachlin y Ferraz-Mello 1998, Kalapotharakos y Voglis 2005) toman la frecuencia de la línea de mayor amplitud, pero ya Binney y Spergel (1982) habían hecho notar que, debido a la libración de algunas órbitas caja, a veces hay que adoptar otra frecuencia que no corresponde a la mayor amplitud. En un modelo fuertemente triaxial (Muzzio 2006) hallamos que 4% de las órbitas regulares presentaban esa característica. Además, un 0.25% adicional de las órbitas regulares de ese mismo modelo también requería adoptar otra frecuencia distinta de la de máxima amplitud; se trata de órbitas sumamente alargadas que se podrían interpretar como casos en los que el epiciclo es de mayor tamaño que el radio de la órbita circular de referencia. En los modelos “casi axisimétricos” aparecen todavía otros casos en que no se puede tomar la frecuencia de máxima amplitud y que estamos analizando.

El método de clasificación de órbitas regulares que prefiero actualmente es el del plano de relaciones de frecuencias. Permite ver lo que pasa (por ejemplo, si hay algún problema como los que acabo de mencionar en la elección de frecuencias) y las distintas órbitas ocupan zonas claramente definidas en ese plano, como muestran las Figuras 2 y 3 de Muzzio (2006).

Las Figuras 7, 8 y 9 de Muzzio et al. (2005) muestran ejemplos de la distribución espacial de las distintas órbitas regulares, como cajas y tubos; en este caso, la clasificación se había hecho con el método de Carpintero y Aguilar (1998).

5. Conclusiones

El método de N-cuerpos es un buen complemento del de Schwarzschild para estudiar la estructura orbital de sistemas estelares (cada uno tiene sus ventajas y desventajas). Nos permite estudiar este tipo de problema con los elementos con que contamos en nuestro país.

Se utilizan distintos tipos de programas (N-cuerpos, indicadores de caos, análisis de frecuencias), cada uno con su propia problemática computacional (ver Apéndice a continuación). Por eso este tema puede resultar, además, interesante para docencia avanzada.

Para este tipo de trabajo es necesario distinguir las órbitas parcial de las totalmente caóticas, ya que corresponden a distribuciones espaciales muy distintas.

Pese a todo lo que se viene trabajando sobre el tema, los métodos de clasificación de órbitas regulares no resultan todavía 100% satisfactorios. Parecería que, a medida que se amplía el universo de modelos estudiados, aparecen nuevas excepciones (órbitas sumamente alargadas, sistemas casi axisimétricos).

Apéndice: El sistema de procesadores múltiples Athena

J.C. Muzzio^{1,2}, H.R. Viturro^{1,2}

(1) *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP*

(2) *Instituto de Astrofísica de La Plata - UNLP y CONICET*

1. Introducción

En los últimos años la paralelización de algoritmos de cálculo ha cobrado gran interés, en particular, en nuestro caso, para la modelización de sistemas de partículas en interacción y su aplicación a la dinámica de sistemas estelares. Ello se debe a que cada vez resulta más fácil el acceso a sistemas compuestos por varias computadoras, con varios procesadores cada una, conectadas en red.

Para el tipo de trabajo que hemos descripto resultaría muy conveniente paralelizar los programas de N-cuerpos. Para todo lo relacionado con el cálculo de órbitas (exponentes de Lyapunov, análisis de frecuencias), en cambio, la paralelización puede ser útil pero es también perfectamente factible, simplemente, asignar el cómputo de distintos grupos de órbitas a diferentes procesadores.

Por otro lado, conviene recordar que nosotros estamos en una Facultad, por lo que resulta particularmente importante que los estudiantes avanzados, que realizan sus tesis de licenciatura o de doctorado, puedan familiarizarse con el uso de herramientas de hardware y de software de este tipo. Dada la difusión alcanzada por las PCs con multiprocesadores, esto ya es el hoy y no el mañana. Es necesario recurrir a técnicas de programación que permiten utilizar, por un lado, procesadores con varias CPUs (multithreading), por ejemplo, con la especificación Open MP, y por otro lado, varios procesadores conectados en red mediante el uso de los sistemas PVM (Parallel Virtual Machine), o MPI (Message Passing Interface) que permite simular un procesador paralelo a través del enlace lógico de varias computadoras. Este se establece comúnmente a través de una red tipo Ethernet con los protocolos TCP/IP.

2. El sistema

2.1. Hardware

Al mes de junio de 2007, el “cluster” Athena consta de dos máquinas con la siguiente configuración de hardware:

Athena

CPU: Dual XEON 5120, Dual Core 1.86GHz

MB: INTEL S5000VSA

RAM: 4GB, 667 MHz, en modo Dual Channel

NIC: Gigabit Ethernet INTEL PRO/1000 Network Connection (PCI Express: 2.5Gb/s: Width x4)

H.D.: 4 discos WD SATA-II (3Gb/s), 250GB, 7200rpm, 16MB cache, operando en modo RAID-5, capacidad efectiva 700GB.

Nodo 1

CPU: Dual XEON 5120, Dual Core 1.86GHz
MB: INTEL S5000VSA
RAM: 4GB, 667MHz, en modo Dual Channel
NIC: Gigabit Ethernet INTEL PRO/1000 Network Connection (PCI Express: 2.5Gb/s: Width x4)
H.D.: 6 discos WD SATA-II (3Gb/s), 320GB, 7200rpm, 16MB cache, operando en modo RAID-5, capacidad efectiva 1.5TB

Red

El sistema está interconectado por medio de un “switch” “3Com OfficeConnect Gigabit Switch 8”.

UPS

APC Smart 300. Autonomía de 50 min. con las dos máquinas conectadas.

2.2. Software

En lo que respecta al software, se utiliza el sistema operativo LINUX, con kernel de la serie 2.4. Se cuenta con compiladores GNU standard, gcc/g77 versión 3.4.6, y también con los compiladores de INTEL, que soportan la especificación OpenMP; además, poseen bondades adicionales de optimización del programa ejecutable, que mejoran muy significativamente el rendimiento respecto de los compiladores GNU. La versión que actualmente se está utilizando es la 9.1.043.

2.3. Descripción

El servidor athena actúa como punto de acceso (front-end) y tiene una partición “/home” de 700GB. Hay también una partición “/locus” de 1.5TB que puede usarse temporariamente y de la que no se realiza backup.

Actualmente utilizamos el sistema MOSIX que permite la migración automática de procesos entre los nodos del cluster, con lo que se balancea dinámicamente la carga de CPU entre los procesadores.

El sistema está configurado de forma tal que tanto el servidor (Athena) como los nodos comparten los mismos recursos, por lo que los usuarios no necesitan conectarse a dichos nodos para ejecutar programas en cada uno: basta con iniciar su ejecución en el servidor para que el sistema MOSIX los distribuya de manera de mantener balanceada la carga de CPU de todo el sistema.

El sistema es compatible con la especificación SMP (Symmetric Multiprocessing) que permite utilizar programación “multithreading” en la paralelización de algoritmos, ya sea mediante la utilización de recursos propios de los compiladores, o a través de lenguajes de programación que incorporen la especificación OpenMP, o en forma directa mediante la biblioteca “libpthread” que forma parte de todas las distribuciones del S.O. LINUX.

También se han incorporado las respectivas bibliotecas de sistema que permiten utilizar el sistema PVM y el MPI y se ha verificado la correcta operación de programas que utilizan estos recursos, funcionando establemente bajo el ambiente operativo LINUX-MOSIX.

2.4. Extensión futura

Ya disponemos de los recursos necesarios para pasar de ocho a dieciséis procesadores entre junio y julio de 2007. De llegar recursos adicionales prometidos, podríamos llegar a veinticuatro procesadores antes del fin del corriente año.

3. Pruebas de programas

Hemos hecho algunas pruebas de velocidad de procesamiento de los programas que empleamos para el estudio de la estructura orbital de sistemas estelares. La Tabla 1 compara los tiempos de cpu obtenidos con una PC basada en un procesador AMD de 2.2GHz, contra los obtenidos utilizando procesadores individuales de Athena con los compiladores de INTEL. Puede observarse que la mayor ganancia se obtiene para el programa de Šidlichovský y Nesvorný, que corre más de tres veces más rápido en Athena que en la PC, en tanto que la menor ganancia corresponde al programa de Hernquist y Ostriker y es del 22 %.

Tabla 1 Comparación de tiempos de cpu para programas típicos

Programa	AMD2.2GHz (segs.)	INTEL1.86GHz (segs.)
Cuadрупolar	3123.2	1364.1
Hernquist-Ostriker	508.0	417.5
LIAMAG	213.6	131.6
Šidlichovský-Nesvorný	471.7	147.5

En cuanto al funcionamiento en paralelo, hasta ahora sólo hemos hecho algunas pruebas utilizando la paralelización automática que ofrece el comando “-parallel” y las mismas mostraron que este tipo de paralelización debe utilizarse con sumo cuidado. Como muestra la Tabla 2, con esa paralelización se consigue una leve ganancia, del orden del 3.5 %, en el tiempo real para el programa de Hernquist y Ostriker; la misma se logra a costa de un leve aumento, del orden del 1.2 %, en el tiempo de cpu repartido ahora entre varios procesadores, por lo que el saldo es mínimo, pero favorable. Sin embargo, en el caso del programa cuadрупolar, se nota un leve aumento en el tiempo de procesamiento real, que se evidencia como catastrófico al comparar los tiempos de cpu: ha tardado casi lo mismo usando cuatro procesadores simultáneamente que al usar un solo procesador.

Tabla 2 Pruebas de paralelización automática

Programa	Sin paralelizar (segs.)	Paralelizado (segs.)
Hernquist-Ostriker (real)	423.2	408.1
Hernquist-Ostriker (cpu)	417.5	422.6
Cuadрупolar (real)	1365.3	1399.3
Cuadрупolar (cpu)	1364.1	5411.2

El cluster ha sido adquirido con subsidios individuales y del IALP correspondientes al grupo de Dinámica Galáctica pero, en tanto no lo utilizamos al 100 %, permitimos su uso a otros grupos. La Tabla 3 muestra los porcentajes de tiempo utilizados por los distintos usuarios en los primeros cien días de funcionamiento. Aunque en este lapso se utilizó algo menos de la mitad del tiempo de cpu disponible, este porcentaje ha ido aumentando con el tiempo y en las últimas semanas es frecuente encontrar al cluster trabajando al 100 % o con diez u once programas repartiéndose entre sus ocho procesadores. Esta es la tendencia habitual en estos equipos ya que, a medida que los usuarios se van acostumbrando a contar con una herramienta más poderosa, la utilizan cada vez más. Obviamente, nuestra aspiración es que se le saque el máximo provecho posible.

Tabla 3 Utilización de Athena por distintos grupos

Usuario	Porcentaje de tiempo de cpu
System Manager	1.55 %
Dinámica Galáctica	13.24 %
Sistema Solar	26.93 %
Interiores Estelares	3.29 %
Total	45.01 %

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado con el apoyo de subsidios de la Universidad Nacional de La Plata, del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

Referencias

- Aguilar, L. A. & Merritt, D. 1990, ApJ, 354, 33
Aquilano, R. O., Muzzio, J.C., Navone, H. D. & Zorzi, A. 2007, BAAA, en prensa
Binney, J. & Spergel, D. 1982, ApJ, 252, 308
Carpintero, D. D. y Aguilar, L. A. 1998, MNRAS, 298, 1
Carpintero, D. D. & Wachlin, F. C. 2006, Cel. Mech. Dynam. Astron., 96, 129
Cincotta, P. M. & Simó, C. 2000, A&AS, 147, 205
Hernquist, L. & Ostriker, J. 1992, ApJ, 386, 375
Holley-Bockelmann, K., Mihos, J. C., Sigurdsson, S., Hernquist, L. & Norman, C. 2002, ApJ, 567, 817
Kalapotharakos, C. & Voglis, N. 2005, Celest. Mech. Dynam. Astron., 92, 157
Merritt, D., & Fridman, T. 1996, ApJ, 460, 136
Muzzio, J. C. 2006, Celest. Mech. Dynam. Astron., 96, 85
Muzzio, J. C., Carpintero, D. D. & Wachlin, F. C. 2005, Celest. Mech. Dynam. Astron., 91, 173
Schwarzschild, M. 1979, ApJ, 232, 236
Šidlichovský, M. & Nesvorný, D. 1997, Celest. Mech. Dynam. Astron. 65, 137

- Udry, S. & Pfenniger D. 1988, *A&A*, 198, 135
Valluri, M. & Merritt, D. 1998, *ApJ*, 506, 686
Wachlin, F. C. & Ferraz-Mello, S. 1998, *MNRAS*, 298, 22
White, S. D. M. 1983, *MNRAS*, 274, 53

COMUNICACIÓN DE TRABAJO – CONTRIBUTED PAPER

Programación semi-definida en astronomía

R. L. Branham, Jr.¹

(1) *Instituto Argentino de Nivología y Glaciología*

Resumen. Programación semi-definida (SDP), una extensión de programación lineal, es una herramienta matemática de gran utilidad cuando es necesario determinar una elipse o un elipsoide para ajustar un conjunto de datos, como la determinación de la órbita aparente de una estrella binaria o el elipsoide de velocidades de un grupo de estrellas. El método calcula una elipse o un elipsoide que representa el mínimo global del criterio de reducción cuando el criterio es L_1 o DOS (“difference of squares”), siempre converge, permite mezclar normas en el criterio de reducción y permite imponer condiciones a la solución, como la velocidad solar dada por el cálculo del elipsoide de velocidades tiene que ser la misma dada por el cálculo de los parámetros cinemáticos. La desventaja principal del método reside en la generación de matrices muy grandes, aunque ralas. Por ende es necesario usar una computadora potente.

1. Introducción

Programación semi-definida (sigla en inglés, SDP) es una extensión de programación lineal, disciplina que nació durante la década de 1940 para maximizar o minimizar una función lineal. La definición matemática de SDP es:

$$\mathbf{C} * \mathbf{X} = \text{máx} \tag{1}$$

o equivalente

$$-\mathbf{C} * \mathbf{X} = \text{mín} \tag{2}$$

donde \mathbf{C} y \mathbf{X} son matrices simétricas y además \mathbf{X} es semi-definida: todos sus autovalores son reales y no-negativos; el símbolo “*” indica la traza del producto matricial. Las ecuaciones (1) y (2) se llaman “la función objetiva.” La optimización está sujeta a las condiciones

$$\mathbf{A}_k \cdot \mathbf{X} = b_k, k = 1, \dots, n, \tag{3}$$

donde las \mathbf{A}_k son matrices simétricas y los b_k escalares. SDP se desarrolló principalmente durante la década de 1990, y hay muchos paquetes de software disponibles gratis en Internet. Empleo generalmente TKLMITool, versión 2.2,¹ software fácil de usar basado en Matlab y que expresa el problema como igualdades y desigualdades matriciales.

¹<http://robotics.eecs.berkeley.edu/~elghaoui>

2. Método de solución

Las condiciones indicadas por la Ec. (3) forman una región, que se llama “región de factibilidad”, donde la solución tiene que hallarse. La Fig. 1 muestra una región de factibilidad. Cualquier solución dentro de esta región se llama una solución factible. La solución que satisface la Ec. (1) o la Ec. (2) es la solución factible óptima. Para calcular la solución se arma una “función de barrera” usando las \mathbf{A}_k y b_k de la Ec. (3). Al parecer el primero en usar la idea de una función de barrera para un problema de optimización fue Karmakar (1984), quien desarrolló la idea para problemas de programación lineal. La Fig. 2 muestra una función de barrera para un problema con dos variables. Las aproximaciones empiezan con una solución factible dentro de la región de factibilidad y siguen el gradiente de la función de barrera hasta llegar a la solución óptima. Una buena referencia, con los detalles del método, es Vandenberghe and Boyd (1996).

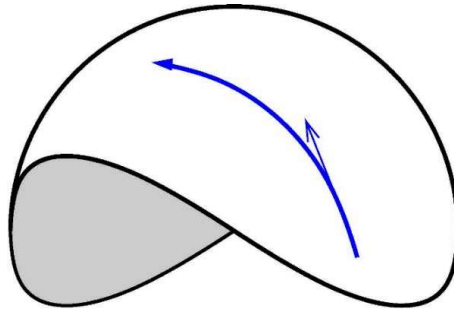


Figura 1. Región de factibilidad con dos soluciones factibles.

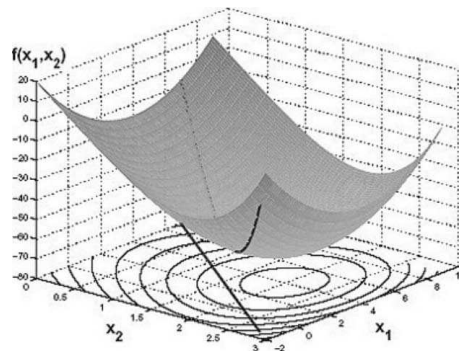


Figura 2. Función de barrera con dos variables.

3. SDP en astronomía

SDP es útil en astronomía cuando el interés es el ajuste de una elipse o un elipsoide a un conjunto de datos. Estos problemas ocurren con el cálculo de la órbita aparente de una estrella binaria y el cálculo del elipsoide de velocidades de un grupo de estrellas. He aplicado el método al cálculo de la órbita aparente

del sistema 24 Aquarii, usando 128 observaciones visuales y speckle, (Branham 2005), al cálculo de la verdadera órbita del mismo sistema, pero empleando más observaciones visuales y speckle, 260 en total, y 129 velocidades radiales doble línea (Branham 2007) y al cálculo del elipsoide de velocidades y parámetros cinemáticos de 290 estrellas de la clase O-B5 III.

Las ventajas de SDP para estos problemas son muchas. Para no tener que considerar dos situaciones distintas, el ajuste de una elipse y de un elipsoide, tomaremos una elipse como un caso especial de un elipsoide, un elipsoide en dos dimensiones. Calafiore (2002) demuestra que el elipsoide que se determina con SDP es único y representa un mínimo global de la función objetivo cuando el criterio para la minimización es el criterio L_1 , minimizar la suma de los valores absolutos de los residuos, o el criterio DOS (“difference of squares”). Si $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ es el vector de la función a minimizar y \mathbf{d} el vector de los datos, el criterio L_1 es

$$|\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{d}| = \text{mín} \quad (4)$$

y el criterio DOS es

$$(\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{f} - \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{d})^T (\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{f} - \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{d}) = \text{mín} . \quad (5)$$

Otra ventaja consiste en la posibilidad de usar una mezcla de normas para la reducción: la función objetivo se expresa como una suma de las normas diferentes. Para el sistema 24 Aquarii, por ejemplo, usé la norma robusta L_1 para las observaciones visual y speckle porque hay obvias observaciones discordantes, mientras que para las velocidades radiales usé la familiar norma de mínimos cuadrados porque los datos son mas limpios. Muchos métodos obligan a usar la misma norma, generalmente mínimos cuadrados, para todas las observaciones. Es fácil imponer condiciones a la solución. Con el problema de la determinación de los parámetros cinemáticos y el cálculo del elipsoide de velocidades de las estrellas O-B5 III, por ejemplo, hay que imponer la condición que la velocidad solar dada por la determinación de los parámetros cinemáticos y la velocidad dada por el cálculo del elipsoide tiene que ser la misma. Finalmente, el método siempre converge si se usan las normas L_1 o DOS, como demuestra Calafiore (2002).

Para ser justo, sin embargo, hay que mencionar una desventaja del método. Las matrices generadas por SDP son grandes, pero ralas. Es casi obligatorio emplear técnicas para matrices ralas si uno quiere evitar tiempo excesivo de procesamiento o hasta agotamiento de memoria.

4. Conclusiones

SDP es una técnica útil para trabajos con estrellas binarias y el cálculo del elipsoide de velocidades. Probablemente existan otros usos en astronomía también porque SDP ha sido usado en procesado de imágenes, una tarea común en astronomía. Pero hay que usar una computadora potente porque el método genera matrices grandes, aunque ralas.

Referencias

- Branham, R. L. Jr. 2005, ApJ, 622, 613
Branham, R. L. Jr. 2006, MNRAS, 370, 1393
Branham, R. L. Jr. 2007, AJ, 134, 274
Calafiore, G. 2002, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 32, 269
Karmarkar, N. 1984, Combinatorica, 4, 373
Vandenberghe, L., & Boyd, S. 1996, SIAM Review, 38, 49

Modelos semianalíticos de formación de galaxias

Héctor Julián Martínez¹

(1) *Instituto de Astronomía Teórica y Experimental (IATE),
CONICET– Observatorio Astronómico, Universidad Nacional de
Córdoba*

Resumen. En este informe invitado se resume la técnica de los modelos semianalíticos de formación de galaxias, sus principales logros y los problemas aún no resueltos. Se hace énfasis en las ideas generales de la técnica y los resultados observacionales en que se inspiran sin entrar demasiado en los detalles técnicos de los modelos desarrollados por distintos autores, con el objeto de dar una idea (muy) general al lector no especializado en el tema.

1. Introducción

En 10 años la cosmología estará resuelta y todo el mundo estará haciendo formación de galaxias– Mario Abadi, hacia 1999.

Estamos en un momento particularmente propicio para el estudio de la formación y evolución de galaxias en el marco de los modelos jerárquicos de formación de estructuras en el universo. Por primera vez en la historia de la cosmología parece haber un consenso mínimo respecto de los parámetros cosmológicos gracias al aporte de estudios de distinta naturaleza: el fondo de radiación cósmica, las supernovas a alto redshift y la estructura en gran escala del universo, lo cual estaría dando la razón a las proféticas palabras del conocido astrónomo cordobés citadas arriba. Aunque se recomienda inocularse con una dosis sana de escepticismo al respecto, el modelo de materia oscura fría con energía oscura parece describir lo observado con la suficiente precisión como para aportar un marco de trabajo adecuado que permite centrar la atención en cómo se formaron y evolucionaron las galaxias sin demasiada preocupación sobre la cosmología.

Quizá la motivación más fuerte para desarrollar modelos de formación de galaxias sea el volumen y la calidad de información observacional obtenida en los últimos 10-15 años referente a galaxias en el universo cercano, y fundamentalmente a redshifts intermedios y altos. Esta información permite estudiar la evolución de las galaxias a lo largo de un 80% de la edad del universo. En definitiva hay muchos hechos observacionales de las galaxias que explicar, por citar los más salientes: la existencia de una masa (luminosidad) característica; por qué la formación estelar es un proceso poco eficiente ($\sim 10\%$ de los bariones están en forma de estrellas); las correlaciones entre propiedades de las galaxias (Tully-Fisher, Faber-Jackson, etc.); la correlación entre las masas de los agujeros negros masivos en los bulbos galácticos y la de los bulbos mismos; efectos ambientales; la existencia de dos poblaciones de galaxias; la presencia de galaxias muy masivas a alto redshift en el marco jerárquico; los descendientes en el universo cercano de las galaxias a alto redshift; etc.

El presente resumen está organizado como sigue: en la sección 2 se ofrece un resumen general de la técnica y se describen los lineamientos generales de la parte más conocida del problema, es decir, la física no disipativa; la parte menos entendida del asunto, la física de los bariones se resume en la sección 3; finalmente se comentan principales éxitos y los problemas aún no resueltos por la técnica semianalítica. Se recomienda al lector abandonar ya mismo la lectura de este resumen y proceder a la lectura del excelente review de Baugh (2006) sobre el tema. Cuando me propusieron dar esta charla invitada, me sirvió de guía y de referencia inevitable.

2. Ingredientes I: universo no disipativo

En los modelos semianalíticos, cada galaxia modelada no es más que un conjunto de parámetros que describen las propiedades físicas de sus distintas componentes y que van evolucionando consistentemente con el tiempo de acuerdo a los procesos físicos que se incluyan en el modelo. La física de la evolución de galaxias consta de dos partes muy diferenciadas, la física de la materia oscura, sencilla, puramente gravitacional y la física disipativa de los bariones extremadamente complicada.

Las galaxias se forman del colapso de bariones en halos de materia oscura. Uno de los primeros puntos a resolver es, entonces, cómo se forman, cómo es la estructura y cuál es la abundancia de los halos de materia oscura de distintas masas. Esta parte de la técnica semianalítica es bien conocida, la física no disipativa no involucra demasiadas complejidades teóricas, ésta es la parte “analítica” de los modelos. Previo a especificar la formación y evolución de los halos de materia oscura debemos especificar el modelo cosmológico en que se formarán y evolucionarán las estructuras. El modelo estándar actual es un universo de materia oscura fría con constante cosmológica, Λ CDM. Una vez conocidos los parámetros cosmológicos que gobiernan el modelo se requiere conocer el espectro de fluctuaciones iniciales y su normalización (eg. Sánchez et al. 2006).

Los modelos de formación de galaxias requieren la siguiente información acerca de los halos de materia oscura: su estructura interna, su abundancia en función de la masa y la historia evolutiva de cada halo.

Estructura interna de los halos de materia oscura: determina a qué tasa el gas se enfría volviéndose disponible para la formación estelar, así como también el tamaño de las galaxias y su dinámica. La estructura de los halos de materia oscura ha sido extensamente estudiada mediante simulaciones numéricas. Uno de los modelos más usados es el de Navarro, Frenk & White (1996). Además del perfil de densidad, es de vital importancia para los modelos especificar el parámetro adimensional de spin, que determina el tamaño de los discos. Las simulaciones muestran que este parámetro tiene una distribución log-normal. Hasta aquí, si conocemos la masa de un halo, podemos asignarle un perfil de densidad y un momento angular.

Abundancia de halos de materia oscura: existen dos acercamientos distintos para calcular la función de masa de los halos, los métodos analíticos (e.g.

Press & Schechter 1974) o las simulaciones numéricas (e.g. Jenkins et al. 2001) y ambos concuerdan razonablemente bien.

Ensamble de halos de materia oscura: la historia de formación de cada halo o *merger tree* puede computarse de 2 formas: usando simulaciones numéricas o usando métodos Monte Carlo. En las simulaciones numéricas se puede seguir la evolución de los halos identificando los halos en cada salida usando algún algoritmo de percolación. Las partículas que conforman un determinado halo pueden ser rastreadas en la lista de halos de la salida anterior y así sucesivamente hasta construir la historia de ensamblaje de cada halo (e.g. Helly et al 2003). Los métodos Monte Carlo (e.g. Lacey & Cole 1993) requieren el conocimiento de la evolución de la función de masa. Con ese conocimiento, dado un halo de masa M a un tiempo t , se puede calcular la probabilidad de que a un tiempo anterior t' ese halo haya tenido 2 progenitores de masas menores M_1 y M_2 . Luego se repite la operación para cada progenitor considerando un tiempo anterior t'' y así sucesivamente hasta armar la historia del halo desde el presente hacia atrás en el tiempo.

3. Ingredientes II: bariones o “gastrofísica”

Hasta aquí contamos con una población de halos de distintas masas y propiedades internas y conocemos la historia de cada uno de ellos, pero para obtener propiedades observables de galaxias que puedan ser comparadas con las observaciones necesitamos al menos formar estrellas, lo cual nos lleva a la física de los bariones, que constituye la incógnita más grande de los modelos. El problema fundamental es que la física que gobierna fenómenos tales como la formación estelar no es aún bien comprendida y es, por cierto, considerablemente más compleja que la física de la materia oscura que es únicamente gravitación. Para atacar el problema se recurre generalmente a recetas y prescripciones que contienen parámetros libres, lo cual ha llevado a acuñar el término *gastrofísica*. Se intenta restringir los valores de los parámetros libres tratando de reproducir un conjunto de observaciones, típicamente a bajo redshift. Entre los procesos a considerar tenemos: enfriamiento del gas en los halos; formación de discos; formación estelar; feedback; formación de esferoides; evolución química; extinción, etc.

Enfriamiento de gas en halos de materia oscura: se supone que el gas en los halos es calentado por shocks a la temperatura virial del halo. Parte de este gas caliente se enfría radiativamente y cae al centro del halo para formar el disco de la galaxia. Para computar la tasa de enfriamiento del gas caliente del halo generalmente se calcula el radio en el cual el tiempo de enfriamiento del gas (que depende de la temperatura, densidad y metalicidad del mismo) es igual a algún tiempo característico, que algunos autores toman como la edad del halo y otros como la edad del universo. Luego la tasa de enfriamiento a un dado tiempo se estima como la masa de gas dentro de ese radio dividida por el tiempo característico. El gas que cae al centro del halo conserva su momento angular específico y es esto lo que genera que se forme un disco de gas frío en rotación en el cual comenzarán a formarse las estrellas.

Formación estelar en discos: el proceso de formación estelar es actualmente poco conocido y extremadamente complejo, es decir, es imposible, partiendo de principios físicos conocer la tasa a la que se forman las estrellas en las galaxias. En los modelos semianalíticos se calcula la tasa de formación estelar partiendo de un análisis dimensional, i.e., la tasa de formación estelar será proporcional a la masa de gas frío disponible en el disco dividida por una escala de tiempo característica de formación estelar que puede ser proporcional al tiempo dinámico del disco (Kauffmann & Charlot 1998, Cole et al. 2000), a alguna potencia de la velocidad circular característica del disco (Baugh et al. 2006), etc, dependiendo de los autores. Asociados a la formación estelar están los procesos de retroalimentación o feedback, cuya importancia es central.

Feedback: los procesos de feedback modulan la eficiencia de la formación de galaxias en halos de materia oscura. Son los procesos que tienen mayor impacto en las características de la población de galaxias modeladas. La necesidad de tener en cuenta procesos de feedback se remonta a White & Rees (1978). En general constituyen la incógnita más grande de los modelos actuales. En sus modelados más comunes se incluye: eyección de parte del gas frío de los discos por explosiones de supernovas (Bower et al. 2001); inyección de energía en el gas caliente del halo modificando su perfil, y por lo tanto su tasa de enfriamiento; reducción de la fracción de bariones que cae en los halos por fotoionización en halos poco masivos (e.g. Benson et al. 2003). Uno de los observables de la población de galaxias que motivó la incorporación de formas más exóticas de feedback es la existencia de una luminosidad característica en la función de luminosidad de las galaxias a partir de la cual la función decae bruscamente para luminosidades mayores. Las soluciones propuestas incluyeron procesos tales como conducción térmica en halos (Benson et al. 2003) y super-vientos de supernovas (Somerville 2002, Benson et al. 2003). El problema es que en ambos casos las eficiencias requeridas para reproducir la función de luminosidad de las galaxias eran incómodamente altas. En los últimos años se ha incorporado el feedback debido a la presencia de AGNs en las galaxias centrales de los halos (Croton et al. 2006, Bower et al. 2006) que no sólo parece haber resuelto el problema sino que ha mejorado la relación color-luminosidad de las galaxias modeladas.

Evolución química: otro de los factores a tener en cuenta en cualquier modelo de formación de galaxias que pretenda predecir observables más allá de observables estadísticos muy globales es la evolución química de las distintas componentes de las galaxias modeladas: el gas caliente del halo, el gas frío del disco y las estrellas. La metalicidad juega un rol importante en todos los procesos físicos que involucran a esas componentes: la tasa de enfriamiento del gas; la luminosidad y el color de las estrellas; la extinción; etc. El enriquecimiento químico en una galaxia es debido a las supernovas y a las eyecciones de material por estrellas masivas. La fracción de masa reciclada en metales dependerá entonces de la función inicial de masas que se adopte. Debe tenerse en cuenta también la contribución de SNI que enriquecen el medio incluso mucho después de la formación de la población estelar a la que pertenecen.

Fusiones de galaxias: en la sección 2 nos referíamos a la historia de un halo como la historia de las fusiones que ese halo experimentó a lo largo de su vida. No hay que olvidar que cada halo alberga originalmente una galaxia central y, a medida que va fusionándose con otros ganará galaxias satélites que eran, a su vez, galaxias centrales de halos menos masivos, o bien, puede pasar a ser una galaxia satélite si la fusión se da con un halo más masivo. Cuando un halo se fusiona con un halo de masa mayor, las galaxias que traía en su interior orbitarán en el potencial del nuevo halo hasta que la fricción dinámica haga que eventualmente caigan hacia la galaxia central y se fusionen con ella. Este proceso de *merger* entre galaxias trae aparejado consecuencias muy importantes para la galaxia resultante que deben ser tenidas en cuenta en los modelos. Es un hecho observacional que durante los mergers de galaxias una fracción importante del gas frío que éstas poseen se consume en violentos episodios de formación estelar o *bursts* que, a su vez, involucra feedback, enriquecimiento químico, etc.

En los modelos usualmente se distingue entre mergers mayores y menores, dependiendo del cociente de las masas entre las galaxias que se fusionan. En general en los mergers mayores se supone que todo el gas frío disponible es consumido en un burst y que los discos de las galaxias se destruyen dando como resultado una galaxia elíptica. En los mergers menores suele suponerse que es la galaxia menor la que es destruida y que todo su contenido estelar pasa a engrosar el bulbo de la galaxia mayor.

Tamaños de las galaxias: tener estimaciones realistas de los tamaños de los discos y bulges de las galaxias modeladas es importante para la predicción de sus observables: tipo morfológico; luminosidad; color; etc. En general se supone que el gas y las estrellas de un disco siguen una ley exponencial, mientras que los esferoides responden a una ley $r^{1/4}$. Para calcular el tamaño característico de un disco exponencial se suele suponer equilibrio centrífugo y conservación del momento angular del gas que se enfría en el halo caliente mientras que para estimar el tamaño del esferoide se supone equilibrio virial y conservación de la energía en los mergers.

Poblaciones estelares y extinción: los últimos ingredientes de nuestra galaxias semianalíticas. Para cada galaxia modelada se construye una historia de formación estelar siguiendo los procesos descritos antes. Esta historia de formación estelar se combina con algún modelo de síntesis de poblaciones estelares (e.g. Fioc & Rocca-Volmerange 1997; Bruzual & Charlot 2003) y un modelo para la extinción por polvo de las distintas componentes de la galaxia para obtener así los observables.

Casi todos los procesos mencionados involucran en su modelado parámetros libres. Éstos se escogen de modo tal de reproducir una serie de observaciones sobre la población de galaxias en el universo local: función de luminosidad en varias bandas fotométricas; relación color-luminosidad; relaciones de escala; abundancia de gas; metalicidades; frecuencia de tipos morfológicos; tamaños de discos y bulbos; etc. También otros hechos observacionales en distintos redshifts se usan para restringir parámetros libres: evolución de la tasa media de formación estelar en el universo; abundancia a alto redshift de galaxias submilimétricas y Lyman-

break; evolución del clustering de quasars y de la abundancia de los mismos; etc.

La lista de problemas no resueltos por los modelos semianalíticos es relativamente larga y podemos enumerar entre otros: el punto cero de la relación de Tully-Fisher; la evolución del plano fundamental de las elípticas; los tamaños de las galaxias requieren una revisión más profunda; los efectos ambientales no están modelados en detalle; la relación color-luminosidad necesita ser mejorada aún. Los modelos semianalíticos son exitosos en predecir un número importante de propiedades observadas de la población de galaxias y su evolución. Lo que es más interesante aún, constituyen un excelente laboratorio para probar ideas nuevas acerca de los procesos físicos involucrados en la evolución de las galaxias con un costo computacional increíblemente bajo si se compara con las simulaciones numéricas con hidrodinámica. Son una plataforma muy interesante para entender las observaciones e interpretarlas en términos del marco jerárquico de formación de estructuras en el universo.

Referencias

- Baugh, C. M. 2006, *Reports of Progress in Physics*, 69, 3101
- Benson, A. J., Bower, R. G., Frenk, C. S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Cole, S. 2003, *ApJ*, 599, 38
- Bower, R. G., Benson, A. J., Lacey, C. G., Baugh, C. M., Cole, S., & Frenk, C. S. 2001, *MNRAS*, 325, 497
- Bower, R. G., Benson, A. J., Malbon, R., et al. 2006, *MNRAS*, 370, 645
- Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Croton, D. J., et al. 2006, *MNRAS*, 365, 11
- Fioc, M., & Rocca-Volmerange, B. 1997, *A&A*, 326, 950
- Helly, J. C., Cole, S., Frenk, C. S., Baugh, C. M., Benson, A., & Lacey, C. 2003, *MNRAS*, 338, 903
- Jenkins, A., Frenk, C. S., White, S. D. M., Colberg, J. M., Cole, S., Evrard, A. E., Couchman, H. M. P., & Yoshida, N. 2001, *MNRAS*, 321, 372
- Kauffmann, G., & Charlot, S. 1998, *MNRAS*, 294, 705
- Lacey, C., & Cole, S. 1993, *MNRAS*, 262, 627
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, *ApJ*, 462, 563
- Press, W. H., & Schechter, P. 1974, *ApJ*, 187, 425
- Sánchez, A. G., Baugh, C. M., Percival, W. J., Peacock, J. A., Padilla, N. D., Cole, S., Frenk, C. S., & Norberg, P. 2006, *MNRAS*, 366, 189
- Somerville, R. S. 2002, *ApJ*, 572, L23
- White, S. D. M., & Rees, M. J. 1978, *MNRAS*, 183, 341

Formación académica de un astrónomo

Pablo M. Cincotta¹

(1) Decano de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

Resumen. El presente trabajo tiene el propósito de contribuir a la discusión sobre lo que debería contemplar la formación académica de un astrónomo en el presente. Se ilustra esta contribución describiendo la formación que actualmente reciben los alumnos de la Licenciatura y el Doctorado en Astronomía de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAG).

1. Formación académica de grado

Comenzaremos por describir la formación que recibe un Licenciado en Astronomía en la FCAG. El plan de estudios vigente data de 1991 y actualmente se encuentra en proceso de revisión/reforma.

El plan está estructurado en 5 años, de los cuales los 3 primeros incluyen asignaturas de formación básica, de carácter obligatorio, y los 2 últimos de formación específica y de carácter optativo, según el siguiente criterio: los dos últimos años el alumno debe reunir 5 puntos. Las asignaturas anuales otorgan 1 punto y las semestrales 0.5 puntos. El plan se completa con un Seminario de Grado y una Tesis de Licenciatura.

Al efecto de seleccionar las materias optativas, un alumno que se encuentra promediando el 3er. año de la carrera debe elegir un Profesor Consejero entre los profesores de la Casa. Dicho profesor es quien elaborará junto con el alumno el plan definitivo de la carrera. Las materias optativas se eligen en principio de un listado de asignaturas reconocidas por la Facultad, sin ninguna otra restricción que reunir en total 5 puntos.

El conjunto de materias optativas son las ofrecidas por los profesores de la Facultad en forma permanente y todas aquellas que resulten de interés, sean o no dictadas en la FCAG o en la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). El aval del Profesor Consejero es suficiente para que una determinada materia forme parte del plan de estudios del alumno. Por ello, existe una gran dinámica en la oferta de materias optativas, tanto por la incorporación de asignaturas de otras Casas de Estudios (con la aprobación del Consejo Académico) así como por las nuevas propuestas efectuadas por los docentes de la Facultad.

Para esta presentación organicé el conjunto de materias optativas reconocidas por la Facultad en 3 grandes bloques: teóricas básicas, teóricas específicas y observacionales, pudiendo existir alguna ambigüedad respecto a la ubicación de alguna de las materias, particularmente entre las teóricas. Por teóricas básicas se entiende materias de formación superior en física y matemáticas, en cambio las de formación específica refieren a asignaturas de fuerte contenido teórico en astronomía. Las observacionales constituyen el conjunto de materias específicas con un fuerte acento en los aspectos observacionales.

FORMACIÓN ACADÉMICA DE GRADO

PRIMER AÑO	SEGUNDO AÑO	TERCER AÑO
Anuales	Anuales	Anuales
ANÁLISIS MATEMÁTICO I (CE)	INGLÉS I	INGLÉS II
ÁLGEBRA (CE)	Primer cuatrimestre	Primer cuatrimestre
ASTRONOMÍA GENERAL	ANÁLISIS MATEMÁTICO II (CE)	MATEMÁTICAS ESPECIALES II (CE)
Primer cuatrimestre	ÁLGEBRA LINEAL (CE)	ASTRONOMÍA ESTELAR
FÍSICA GENERAL I (CE)	FÍSICA GENERAL III (CE)	ANÁLISIS NUMÉRICO I (CE)
Segundo cuatrimestre	COMPUTACIÓN	MECÁNICA ANALÍTICA
FÍSICA GENERAL II (CE)	Segundo cuatrimestre	Segundo cuatrimestre
	FÍSICA MODERNA	MECÁNICA CELESTE I
	MATEMÁTICAS ESPECIALES I (CE)	ESTADÍSTICA APLICADA
	ASTRONOMÍA ESFÉRICA	SISTEMAS ESTELARES
		ELEMENTOS DE ASTROFÍSICA TEÓRICA
CUARTO AÑO	QUINTO AÑO	
MATERIAS OPTATIVAS PARA SUMAR TRES PUNTOS	SEMINARIO	
	MATERIAS OPTATIVAS PARA SUMAR DOS PUNTOS	
	TESIS DE LICENCIATURA	
OPTATIVAS		
TEÓRICAS BÁSICAS	TEÓRICAS ESPECÍFICAS	OBSERVACIONALES
MECÁNICA CUÁNTICA I Y II (CE)	ATMÓSFERAS ESTELARES	ASTRONOMÍA OBSERVACIONAL
ELECTROMAGNETISMO I Y II (CE)	INTERIORES ESTELARES	ÓPTICA ASTRONÓMICA
ECUACIONES DIF. PARCIALES	DINÁMICA ESTELAR	ASTROF. DE LA EMISIÓN RADIO
DINÁMICA NO LINEAL	ORIGEN Y EVOLUCIÓN DEL SS	MEDIO INTERESTELAR
MECÁNICA ESTADÍSTICA I Y II (CE)	ASTROFÍSICA RELATIVISTA (3)	ASTRONOMÍA PRÁCTICA
TERMODINÁMICA (CE)	POSICIONAMIENTO SATELITARIO	ASTEROIDES
MECÁNICA DE FLUIDOS (CE)	GRAVITACIÓN (CE)	TÉCNICAS OBSERV. RADIOASTR.
GEOMETRÍA Y MECÁNICA (CE)	MECÁNICA CELESTE II	ESPEC. ATÓMICA Y MOLEC. MI
ESTADÍSTICA I Y II (CE)	ELEMENTOS DE GEODESIA FÍSICA	
MEDIDA E INTEGRACIÓN (CE)		
ANÁLISIS FUNCIONAL (CE)		
SEÑALES Y SISTEMAS (FI)		
ELEMENTOS DE ASTRONOMÍA COMPUTACIONAL		

Figura 1. Plan de estudios vigente de la Licenciatura en Astronomía, (CE) indica que las asignaturas se cursan en la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP. Se han incluido la mayoría de las asignaturas optativas, que otorgan 0.5 y 1 puntos dependiendo de la carga horaria de la materia (ver texto).

Cabe señalar que en la formación inicial (los 3 primeros años), sólo 7 semestres corresponden a materias de contenido astronómico y 21 semestres corresponden a asignaturas de formación en matemática, física, computación e idiomas. Esto es, un 25 % corresponde a formación astronómica y un 75 % a formación general básica.

En lo que respecta a la formación astronómica básica en los 3 primeros años, existe un curso anual introductorio a la astronomía (Astronomía General), uno de astronomía de posición (Astronomía Esférica), un curso de astrofísica estelar y uno de sistemas estelares con un perfil observacional (Astronomía Estelar y Sistemas Estelares), uno de introducción a la astrofísica teórica donde se incluye estructura estelar, atmósferas estelares y dinámica de sistemas estelares (Ele-

mentos de Astrofísica Teórica) y un curso de Mecánica Celeste básica (Mecánica Celeste I). En cambio, del conjunto de optativas reconocidas, 17 asignaturas semestrales corresponden a teóricas básicas (42 %), 14 a teóricas específicas (34 %) y 10 a observacionales (24 %).

Sería deseable que el desbalance entre la formación básica físico-matemática y astronómica existente en los 3 primeros años se revierta en los 2 últimos, donde el alumno completa su formación. No obstante, no existiendo regulación alguna, es perfectamente posible que un alumno concluya su Licenciatura en Astronomía sin haber cursado ninguna materia de formación específica en astronomía. Asimismo, pareciera que la especialización del alumno comienza demasiado temprano en su carrera, cuando aún no cuenta con suficientes elementos para elegir su orientación. Por otra parte, se observa que los alumnos que han completado su plan mayoritariamente con asignaturas básicas en física y matemáticas, tienen serias dificultades para definir su tema de Tesis de Licenciatura.

2. Formación académica de posgrado

La formación académica de posgrado se rige en la FCAG por una reglamentación relativamente reciente, que exige al alumno de posgrado la realización de actividades académicas para reunir 20 créditos, sobre la base de 1 crédito cada 15 horas efectivas de clase. También puede reunir créditos por escuelas o pasantías de muy alto nivel académico, pero con restricciones. Posteriormente debe presentar su Tesis Doctoral. Tratándose de un doctorado categorizado A por CONEAU, es imprescindible mantener la máxima jerarquía académica, tanto en las actividades que desarrollan los alumnos como en las exigencias para la Tesis Doctoral.

ACTIVIDADES DE POSGRADO 2007 EN ASTRONOMÍA (ofrecidas por FCAGLP)

- INTRODUCCIÓN A LA COSMOLOGÍA RELATIVISTA (6.5)
- ESPECTROSCOPIA ÓPTICA: ASPECTOS INSTRUMENTALES, CÁLCULOS ATÓMICOS Y ANÁLISIS ESPECTRAL(5)
- VIENTOS ESTELARES Y TRANSPORTE DE RADIACIÓN EN MEDIOS EN MOVIMIENTO (5)
- PERSPECTIVAS DE DINÁMICA NO LINEAL Y CAOS (10)
- CAOS EN SISTEMAS HAMILTONIANOS MULTIDIMENSIONALES (10)
- MODELOS DE ESTRUCTURA NUCLEAR, TERMODINÁMICA Y APLICACIONES (6)
- ESTRELLAS SIMBIÓTICAS (5)
- IONÓSFERA Y MEDIO SOL-TIERRA (5.5)
- INTRODUCCIÓN A LA FILOSOFÍA EXACTA DE LA CIENCIA (3.5)
- INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA RELATIVISTA (6)
- INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS I y II (CE - 6.5 C/U)
- ELEMENTOS BÁSICOS DE FÍSICA NUCLEAR (4)
- GALAXIAS ACTIVAS (6.5)
- EL ESPACIO TRANSNEPTUNIANO

Figura 2. Actividades académicas de posgrado ofrecidas por la FCAG en el ciclo 2007.

En la Figura 2 se detalla la actividad académica ofrecida por la FCAG para el ciclo 2007, indicándose los créditos que otorga cada una de ellas. Estas materias/cursos/seminarios son en general de oferta permanente, y a ellos se agregan

cursos dictados por profesores visitantes. Para el ciclo 2007 están previstos, al menos, 4 ó 5 cursos dictados por especialistas de máxima jerarquía. Cabe señalar que en su mayoría, la oferta de actividad académica de posgrado es de formación muy específica en diferentes tópicos de la astronomía.

También se acepta como actividad académica de posgrado, cursos de otras Unidades Académicas tanto de la UNLP así como de otras Universidades. Asimismo, se reconocen como actividad académica de posgrado, asignaturas de grado no cursadas por el alumno durante su licenciatura en el caso que las mismas contemplen un complemento que exceda ampliamente el contenido habitual del programa de grado.

Para el ciclo lectivo 2008, además de la oferta permanente de actividades académicas de posgrado, está prevista la realización de la escuela internacional *1st. La Plata International School on Astronomy and Geophysics*, dedicada a la astrofísica de objetos compactos y su emisión. El plantel de profesores incluye 10 especialistas de máxima jerarquía en este campo y de diferentes centros de docencia e investigación del país y del exterior. Esta escuela otorgará créditos para el posgrado y está comprometida la continuidad de esta serie de escuelas internacionales, en otras temáticas, con una periodicidad anual o bienal.

3. Consideraciones Generales

CONSIDERACIONES GENERALES

UNA "BUENA" FORMACIÓN COMO ASTRÓNOMO TEÓRICO REQUIERE DE:

SÓLIDA FORMACIÓN EN FÍSICA Y MATEMÁTICA

DOMINIO DE LOS PROBLEMAS ASTROFÍSICOS BÁSICOS (CLÁSICOS) EN AL MENOS:

ESTRUCTURA Y EVOLUCIÓN ESTELAR

ATMÓSFERAS ESTELARES

SISTEMAS PLANETARIOS

SISTEMAS ESTELARES

ALTAS ENERGÍAS

COSMOLOGÍA

PROCURAR UN EQUILIBRADO BALANCE ENTRE LA FORMACIÓN FÍSICO-MATEMÁTICA Y LA FORMACIÓN ASTRONÓMICA TEÓRICA Y OBSERVACIONAL.

DICTADO DE LAS ASIGNATURAS ESPECÍFICAS POR ESPECIALISTAS EN EL TEMA.

Figura 3. Resumen de los aspectos centrales que debe abarcar la formación de un astrónomo teórico.

A mi juicio una buena formación académica de un astrónomo teórico requiere de una sólida formación en física y matemática y del dominio de los conceptos básicos de siguientes aspectos astronómicos: evolución estelar, atmósferas estelares, sistemas estelares, sistemas de referencia, sistemas planetarios, fenómenos de altas energías, cosmología básica. Este listado no es exhaustivo y cada línea de investigación es muy amplia como para ser dominadas en su totalidad por un astrónomo teórico. No obstante, considero que si se poseen los fundamentos básicos, no sólo se enriquece la formación del futuro investigador, sino que se le

brinda un *background* suficientemente amplio como para abordar cualquiera de estas temáticas (u otras de punta) en el presente.

En otro orden, como ya se mencionó, es fundamental mantener un delicado balance entre la formación físico–matemática y la astronómica, tanto teórica como observacional. En efecto, siendo la astronomía una ciencia, requiere en igual medida de la experimentación u observación y de la teoría. Por ello el plan de estudios debería contemplar materias obligatorias con prácticas observacionales, por ejemplo en CASLEO. Debería fomentarse y facilitarse desde CASLEO las prácticas observacionales para alumnos de todas las carreras de astronomía del país.

Un aspecto que considero condición necesaria, es que las asignaturas específicas sean dictadas por especialistas en el tema. Es preferible excluir del plan de estudios alguna formación específica si no se cuenta dentro del plantel de profesores con especialistas en dichos temas.

Si bien me inclino hacia una formación general amplia y sólida, lo que conlleva una carrera de grado muy completa, "el mercado laboral" local e internacional impone restricciones a la edad del graduado. Por ello, considero que debe procurarse una licenciatura que demande 4 años de cursos y el último año sólo incluya la tesis de licenciatura. Para completar la formación, posiblemente resulte necesario incrementar las exigencias de actividad académica en el posgrado. En este sentido, a mi juicio es imprescindible equiparar la formación de grado en las escuelas de astronomía del país, de manera que los posgrados en Astronomía resulten de acceso directo a todos los Licenciados en Astronomía, sin necesidad de equiparación previa alguna. La Figura 3 resume los puntos detallados en esta sección.

En función de la experiencia recogida en todos estos años, tanto en la gestión académica como en la elaboración de planes de materias optativas para numerosos alumnos, considero que la currícula debería incluir contenidos mínimos en los siguientes aspectos:

Formación Matemática: 9/10 semestres

Álgebra; Álgebra lineal; Geometría Analítica, Cálculo: en una variable, en varias variables y variable compleja; Ecuaciones Diferenciales Ordinarias y Parciales; Probabilidades y Estadística; Cálculo Numérico y Computación.

Formación Física: 8/9 semestres

Física elemental: Mecánica, Termodinámica, Ondas, Electricidad y Magnetismo, Óptica, Fundamentos Cuánticos; Mecánica Clásica; Electromagnetismo; Relatividad Especial; Mecánica Cuántica; Mecánica Estadística.

Formación Astronómica: 7/8 semestres

Introducción a la Astronomía; Astronomía de Posición; Astrofísica Estelar y de Sistemas Estelares; Prácticas Observacionales (incluyendo métodos astrométricos); Astrofísica Teórica (estructura estelar y atmósferas estelares) Astronomía Dinámica (sistemas planetarios, galácticos y cosmología básica).

Luego de completar este ciclo, se podrían incluir 4/5 semestres de asignaturas optativas, de las cuáles 3 deberían ser de contenido específico en astronomía, y la Tesis de Licenciatura. Los idiomas pasarían a ser una actividad extracurricular.

Es preciso recalcar que lo que detallo arriba refiere a contenidos mínimos en los diferentes tópicos; no puede pensarse en un curso semestral por cada uno de ellos, particularmente en lo que respecta a la formación en física, matemáticas y computación. Esta propuesta de contenidos abarcaría unos 25/27 semestres y adicionando 4/5 semestres más de especialización, llevaría la extensión del período de cursadas a alrededor de 4 años (32 semestres o menos).

Una formación académica que contemple estos contenidos mínimos, resultaría adecuada tanto para un astrónomo teórico como observacional. Manteniendo 4/5 asignaturas optativas, de manera de otorgarle flexibilidad al plan, el alumno podría definir su especialización, la que completaría con la Tesis de Licenciatura. Una vez graduado, el alumno profundizaría su formación en el posgrado. Para ello, sería deseable aumentar la carga de actividades académicas a realizar por el doctorando, subiendo de 20 a 30 créditos la exigencia, pero 15 créditos deberían reunirse con materias/cursos/seminarios de formación de posgrado en astronomía. Nótese que se está proponiendo una carrera de doctorado semi-personalizada, otorgándole libertad al director y al alumno para definir la actividad académica de posgrado, pero con la restricción de que el 50 % de ella debe corresponder a formación superior en alguna línea de investigación en astronomía existente en el país.

4. Sugerencias y Propuestas

Al efecto de poder ofrecer una formación académica que incluya la mayor cantidad de líneas de investigación, considero importante implementar algún programa de movilidad de docentes y alumnos entre los diferentes centros de docencia e investigación en astronomía.

Asimismo, deberían potenciarse los cursos dictados por profesores visitantes de máxima jerarquía internacional. Estos cursos deberían enmarcarse en el mencionado programa, de manera que puedan ser tomados por todos aquellos alumnos de astronomía interesados, independientemente de la institución que ofrezca el curso.

Un programa de movilidad de tal característica resultaría beneficioso no sólo para los alumnos sino también para los docentes-investigadores, ya que fomentaría la colaboración científico-académica entre los centros de docencia e investigación en astronomía del país. Cabe destacar que en la actualidad la cooperación científica entre investigadores de diferentes instituciones es, a lo sumo, muy escasa.

Dicho programa, que inicialmente debería aplicarse al posgrado y luego extenderse al grado, permitiría contribuir a la equiparación de conocimientos de todos los graduados en astronomía.

Para que el programa resulte exitoso, es indispensable que las instituciones participantes del mismo reconozcan académicamente los cursos y se normalice la asignación de créditos.

Asimismo, con el objeto de elevar aún más la jerarquía y excelencia académica del Doctorado en Astronomía en el país, debería procurarse que en los jurados de tesis participe, además de un miembro externo a la institución que otorga el grado académico, un experto internacional. Para ello resultaría necesario adecuar las reglamentaciones y un presupuesto para su financiación.

Al efecto de implementar este programa debe necesariamente existir un fondo para financiar traslados y estancias. Dicho fondo específico podría provenir de un programa a tal efecto del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología más aportes de las Facultades/Universidades intervinientes y la Asociación Argentina de Astronomía. Estas consideraciones finales se encuentran resumidas en la Figura 4.

SUGERENCIAS Y PROPUESTAS

UTILIZAR LOS CURSOS DE GRADO Y DEL POSGRADO PARA LOGRAR EL BALANCE EN LA FORMACIÓN

FOMENTAR EL INTERCAMBIO DE DOCENTES Y ALUMNOS ENTRE LAS ESCUELAS Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN EN ASTRONOMÍA DEL PAÍS.

EN UNA PRIMERA ETAPA CIRCUNSCRIBIR EL INTERCAMBIO AL POSGRADO, CON EL DICTADO DE CURSOS ACREDITABLES PARA EL DOCTORADO.

GESTIONAR EN CADA INSTITUCIÓN MECANISMOS PARA EL RECONOCIMIENTO ACADÉMICO DE LOS CURSOS.

CREAR UN FONDO EN CADA INSTITUCIÓN O EN EL ÁMBITO DE LA AAA, PARA SOLVENTAR LOS COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE INTERCAMBIO DOCENTE.

Figura 4. Resumen de las sugerencias y propuestas.

Finalmente, considero que resulta necesario el debate de toda la comunidad astronómica sobre la formación académica presente y futura de un astrónomo, teórico u observacional. El ámbito de la Asociación Argentina de Astronomía podría ser uno de ellos, por ejemplo, reservando sesiones específicas durante las reuniones anuales dedicadas exclusivamente a este fin, donde participen los responsables académicos de las carreras, docentes, investigadores y estudiantes, tanto de grado como de posgrado.

Agradecimientos. Deseo expresar mi agradecimiento a la Asociación Argentina de Astronomía por invitarme a realizar esta presentación y al equipo de colaboradores que me han hecho llegar valiosas sugerencias: Felipe Wachlin, Alejandro Córscico y Amalia Meza.

COMUNICACIÓN DE TRABAJO – CONTRIBUTED PAPER

Evolución dinámica de objetos tipo Centauros

F. López García, J. Correa

*Dpto de Astronomía y Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas,
UNSJ*

Abstract. We have analyzed the dynamical behaviour of objects located in a position $22 < a < 26$ AU which corresponds to the mean motion resonances 3:2 and 2:3 with Neptune and Uranus, respectively. Most of the studied objects migrate towards the external part of the Solar System, called Kuiper belt, a scattered disk in the $a > 30$ AU region. Some are ejected off the Solar System with $e \rightarrow 1$. Of the test particles studied less than 10 % migrate towards the inner part, in some cases becoming Earth and Mars crossing. This fact may be a source of near-Earth objects (NEOs), as asteroids in the Main Belt lying near the 3:1 resonance with Jupiter. The majority of the objects have collisions with the giant planets and make numerous close approaches to Jupiter and Saturn. Other clones, a few, can reach the region $a \sim 500$ AU, $e \sim 0.78$, $i \sim 15^\circ$ (Sedna: $a = 509$ AU, $e = 0.851$, $i = 11^\circ.9$). This behaviour of some clones occurs when Neptune has $a = 28$ AU.

Resumen. Se analiza el comportamiento dinámico de partículas de prueba en la región comprendida entre 22 y 26 UA, la cual contiene las resonancias 3:2 y 2:3 con Neptuno y Urano respectivamente. La mayoría de los clones estudiados migra hacia la parte externa del Sistema Solar, llamada cinturón de Kuiper. Algunos objetos son eyectados del Sistema en forma rápida, con $e \rightarrow 1$. Otras partículas de prueba, menos del 10 %, migran hacia la parte interna del Sistema Solar, en algunos casos cruzan las órbitas de la Tierra y Marte; esta circunstancia puede ser una fuente de los *near Earth objects* (NEO) ya que antes alcanzan la región de la resonancia 3:1 con Júpiter. La mayoría de los clones estudiados colisionan con los cuatro planetas gigantes o tienen aproximaciones con Júpiter y Saturno, mientras que otras partículas, muy pocas, alcanzan la región $a \sim 500$ UA, $e \sim 0.78$, $i \sim 15^\circ$ (Sedna: $a = 509$ UA, $e = 0.851$, $i = 11^\circ.9$) cuando Neptuno tiene inicialmente $a = 28$ UA.

1. Introducción

En la década del 90 se incrementó en forma notable el número de pequeños cuerpos descubiertos entre las órbitas de Júpiter y Neptuno; se trata de una población transitoria denominada *centauro*. El primero fue (2060) Chiron en 1977 (Kowal, 1989); sus elementos orbitales son $a = 13.7$ UA, $e = 0.38$, $i = 6^\circ.9$, $q = 8.46$ UA; sus dimensiones son: diámetro 148 a 208 km, masa 2×10^8 a 10^9 kg, período de rotación ~ 5.9 hs. En los últimos años el número de objetos descubiertos se incrementó considerablemente. Estos objetos están caracterizados por

tener órbitas caóticas, cuyo perihelio se encuentra entre las órbitas de Júpiter y Neptuno, por lo tanto, cruzan generalmente las órbitas de los planetas gigantes y tienen un tiempo de vida dinámico relativamente corto: $\sim 10^6$ años (ver Horner et ál. 2003, 2004a). Por lo tanto, ellos deben tener su origen en un reservorio más estable dinámicamente, situado en la parte externa del Sistema Solar. Un hecho observacional destacable es que los Centauros son objetos que han escapado del cinturón de Kuiper (KB) y representan una población dinámica intermedia entre el cinturón de Kuiper relativamente estable y los cometas de corto período de la familia de Júpiter (JFC). Este escenario está fundamentado en las investigaciones teóricas que han explorado la conexión entre los objetos del cinturón de Kuiper (KBO) y JFC mediante simulaciones numéricas (Duncan, Quinn & Tremaine, 1987, 1988; Holman & Wisdom, 1993; Levison & Duncan 1993, 1997; Duncan & Levison 1997; Morbidelli 1997; Tiscareno & Malhotra, 2003; Horner, Evans & Bailey, 2004a,b). Mientras que el estudio de la dinámica de los objetos del cinturón de Kuiper ha sido y continúa siendo uno de los temas actuales de investigación, relativamente poca atención se ha dado al estudio del comportamiento dinámico de la población de objetos Centauros. Se recomienda leer el artículo de Levison & Duncan (1997), quizás el que mejor explica el movimiento de estos objetos. En este trabajo, los autores, utilizando un modelo numérico, señalan que en su evolución dinámica, aquellos objetos que escapan del cinturón de Kuiper se convierten en JFC incluyendo su estado transitorio como Centauros. Tanto el estudio de Levison & Duncan como trabajos anteriores suponían que el origen de la población del cinturón de Kuiper es dinámicamente “frío”, i. e., sus órbitas son casi circulares y las inclinaciones pequeñas. Sin embargo, observaciones realizadas en la última década demostraron que el cinturón de Kuiper no es dinámicamente “frío”, por el contrario, los objetos que pertenecen a este cinturón (KBO) tienen, sorprendentemente, una amplia distribución en la excentricidad e inclinación orbital. Además, este cinturón está compuesto de varias poblaciones dinámicamente distintas, ellas son: a) los KBO resonantes, b) el cinturón principal no resonante ó KBO clásicos, y c) los *Scattered Disk Objects* (SDO) (Malhotra, Duncan & Levison, 2000). Tiscareno & Malhotra (2003) sugieren que la relación entre el KB y JFC necesita ser revisada utilizando modelos dinámicos que tengan en cuenta la excitada y compleja estructura del KB. En este trabajo estudiamos el comportamiento dinámico de la población de objetos intermedia entre los KBO y JFC, denominados Centauros. En este trabajo hemos analizado el comportamiento dinámico de partículas de prueba situadas en la región comprendida entre las resonancias 3:2 con Neptuno ($a \sim 23.03$ UA) y 2:3 con Urano ($a \sim 25.28$ UA). El objeto de estudiar estos clones, por un período de tiempo de 10^8 años, es comprender su evolución orbital, su eventual destino cosmogónico y la actual distribución de los objetos Centauros. En la Sección 2 describimos el modelo numérico utilizado. En la sección 3, presentamos los resultados obtenidos incluyendo el tiempo de vida dinámico para distintos clones, así como también los encuentros y colisiones con los planetas gigantes. En la Sección 4, discutimos los resultados con el objeto de contribuir a comprender el comportamiento de estos “planetesimales” tan inestables.

2. El modelo dinámico

Utilizando la base de datos (cfa-www.harvard.edu/iau/list/Centaurs.html) del Minor Planet Center (MPC), hemos representado en el espacio $e - a$ la posición de 151 Centauros conocidos (actualizada a octubre de 2004). La Figura 1a muestra esta distribución; a la derecha del gráfico se encuentran dos objetos situados a más de 500 UA con gran excentricidad ($e > 0.8$); uno de ellos es el planetoide denominado Sedna (90377) descubierto en noviembre de 2003 por Michael Brown y sus colegas del CALTECH (California Institute of Technology in Pasadena). La Figura 1b muestra la distribución e vs. a de los objetos transneptunianos, los parámetros orbitales utilizados incluyen objetos Centauros y SDO. Las líneas verticales indican las distintas posiciones de las resonancias con Neptuno. Los objetos cuya distancia al perihelio es interior a la órbita de Neptuno se definen como Centauros para distinguirlos de los SDO cuyo perihelio es exterior a la órbita de este planeta; este criterio permite diferenciarlos. Aunque esta clasificación basada únicamente en la distancia al perihelio q es razonable, dinámicamente es bastante “incompleta”. Tiscareno & Malhotra (2003) sugieren mejorar esta definición teniendo en cuenta sus resultados numéricos, a saber: estos cuerpos tienen dinámicamente poca vida debido a la fuerte interacción con los planetas gigantes; su origen es probablemente el cinturón de Kuiper. Prevalece la idea que los Centauros son objetos que han escapado de la población de SDO (Delsanti & Jewitt 2006). Es probable que otras regiones contribuyan con la población de los Centauros. Nuestras simulaciones tienen en cuenta este criterio para seleccionar las condiciones iniciales de las partículas de prueba, es por ello que hemos considerado una zona entre $22 < a < 26$ UA. Nuestro modelo considera a los Centauros como planetesimales con masa despreciable, excentricidad $e < 0.1$, inclinación $i < 2^\circ.5$; los parámetros angulares longitud de nodo Ω , argumento del perihelio ω y anomalía media M se eligen al azar. El tiempo total de integración es 100 Myr. Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el integrador simpléctico Evorb 12; autores: A. Brunini & T. Gallardo, 2005 (<http://www.fisica.edu.uy/~gallardo/mece/mc00.html>).

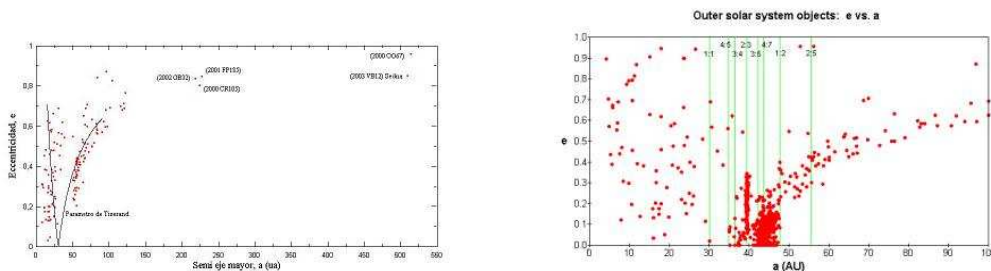


Figura 1. *Izquierda:* Objetos Centauros observados hasta octubre 2004. *Derecha:* Distribución en el plano $a - e$.

El parámetro de Tisserand T , con respecto a Neptuno, para los Centauros que cruzan solamente la órbita de este planeta es inferior a 3, ver Figura 1a. Esto indica la naturaleza dinámicamente “caliente” de estos objetos. En este trabajo, los valores medios adoptados son $a \sim 24.5$ UA, $e < 0.1$, $i \sim 2^\circ.5$ y $a_{\text{Nept}} = 39.61$ UA,

por lo tanto el parámetro de Tisserand¹ $T \simeq 3.18$. El modelo dinámico adoptado es el siguiente: las partículas de prueba sin masa, mientras que los planetas gigantes tienen sus masas reales; estudiamos la evolución orbital del sistema durante 100 Myr teniendo en cuenta sólo las perturbaciones de los cuatro planetas exteriores (se excluye Plutón). También consideramos las perturbaciones mutuas entre los planetas. Si alguna partícula de prueba alcanza $a \sim 2.5$ UA es eliminada (resonancia 3:1 con Júpiter). El paso de integración es de 80 días (~ 0.2 de año). Los datos de salida nos han permitido hacer un seguimiento individual de cada partícula el cual fue utilizado para analizar la dinámica muy caótica de estos objetos; también nos permitieron examinar el comportamiento estadístico de sus órbitas. Realizamos 27 integraciones, incluyendo en cada una 500 partículas de prueba con elementos orbitales iniciales distintos.

Levison & Morbidelli (2003) propusieron que el disco protoplanetario (donde los planetas, asteroides y cometas se formaron) tuvo un abrupto borde en la posición actual de Neptuno, en 30 UA y que la región que ahora ocupa el cinturón de Kuiper estuvo vacía. Todos los objetos de este cinturón, que ahora vemos más allá de Neptuno, se formaron mucho más cerca del Sol, y fueron transportados hacia afuera en los momentos finales de la formación planetaria. Concretamente, Urano y Neptuno se formaron más cerca del Sol y emigraron hacia el exterior. Levison y Morbidelli proponen que Neptuno podría haber arrastrado consigo todos estos objetos durante su migración. “*Realmente no sabíamos cómo resolver el problema de la pérdida de masa*”, comentó Levison y agrega “*según nuestro trabajo, la región transneptuniana estuvo probablemente vacía en un principio*”. Sin embargo, en este modelo, la región interior a las 30 UA sí contenía suficiente material como para que los objetos del cinturón de Kuiper se formaran. Tsiganis et ál. (2005) postularon “*una hipótesis sobre la migración de Neptuno*”. Se admite que durante la formación del Sistema Solar, quizás en los primeros 2×10^8 años, el planeta Neptuno se desplazó hacia el exterior una distancia entre 5 y 10 UA. Esta *migración de Neptuno* se produjo conforme el planeta iba desplazando planetesimales hacia dentro del Sistema Solar aunque también expulsaba muchos hacia la parte externa. Sin duda, la observación y el estudio de nuevos objetos transneptunianos explicará este proceso de migración planetaria. Teniendo en cuenta este proceso hemos variado las dimensiones de la órbita de Neptuno; iniciando su posición con $a = 22$ UA hasta llegar a su posición actual. La variación fue $\Delta a = 2$ UA. Probablemente este modelo pueda explicar el vacío de objetos que hay en la región que hemos estudiado debido a la migración de Neptuno durante su fase inicial. El análisis de los resultados se resume en gráficos en la siguiente sección.

3. Resultados

Los resultados numéricos se muestran en los siguientes gráficos. La Figura 2a representa, en el plano $e - a$, la evolución dinámica de 500 partículas de prueba situadas inicialmente en $e < 0.1$, a en el intervalo $22 - 26$ UA, e $i < 2^\circ.5$ y

¹El parámetro de Tisserand de una partícula, con respecto a un planeta, permanece casi invariante a través de encuentros con este planeta; $T = a_p/a + 2(a(1-e)^2/a_p)^{\frac{1}{2}} \cos i$; donde a_p es el semieje mayor del planeta y los otros restantes elementos de la partícula.

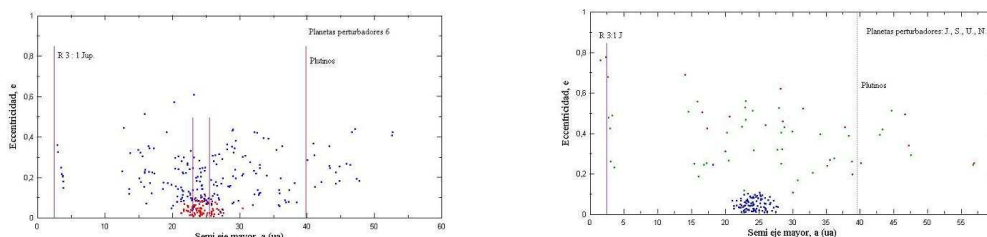


Figura 2. *Izquierda:* Plano a - e , la mayoría de las partículas son expulsadas hacia el KB. *Derecha:* El gráfico muestra la evolución de 500 partículas de prueba luego de 80 Myr.

su estado dinámico después de 5 Myr (puntos cuadrados). En esta simulación están incluidos los cuatro planetas gigantes y los planetas interiores Tierra y Marte. Las partículas situadas a la izquierda del gráfico están próximas a la resonancia 3:1 con Júpiter (región muy caótica); las partículas restantes ($\sim 90\%$) son expulsadas hacia la parte externa del Sistema Solar; por esta razón es que sólo incluimos aquellos objetos dispersos hasta una distancia de 60 UA. Muchas partículas ($\sim 60\%$) son expelidas del sistema rápidamente, ($e \rightarrow 1$). La Figura 2b muestra la evolución dinámica del sistema en tres instantes distintos, los puntos rojos representan la evolución final luego de 80 Myr; como se puede observar, las partículas que quedan son muy pocas. Los puntos verdes corresponden a la evolución en la mitad del intervalo y los azules al instante inicial. La Figura 3 muestra la evolución final de 500 partículas después de 100 Myr. Los puntos rojos muestran que un pequeño porcentaje de objetos estudiados alcanzan la parte interna del Sistema Solar, la mayoría de los cuales colisionan con el Sol, generalmente con alta excentricidad. Otros pueden sobrevivir permaneciendo en órbitas estables durante un tiempo de 100 Myr con $e < 0.34$. Un resultado importante, para destacar, es que algunas partículas pueden alcanzar órbitas estables con $a \simeq 500 - 520$ UA, $e \simeq 0.75 - 0.86$, $i \sim 15^\circ$ en 100 Myr, similares al objeto 2000 VB12 (Sedna); estas trayectorias estables se obtuvieron con la posición inicial de Neptuno $a = 28$ UA, $e = 0.008$, $i = 1^\circ.77$, ver Figura 4. También el gráfico prueba que pueden sobrevivir partículas (con e grande) en la parte interna del Sistema Solar como lo muestran los puntos situados en el extremo izquierdo, y la formación de objetos del tipo Plutinos.

4. Conclusiones

La evolución dinámica de las partículas de prueba estudiadas confirma que la región considerada, entre $23 < a < 26$ UA, $e \leq 0.1$, $i \leq 2^\circ.5$, es muy inestable; las 27 simulaciones numéricas realizadas en esa región, explicarían la exigua existencia de objetos, lo cual es comprobado a través de su comportamiento dinámico. La evolución de las órbitas demuestra que la mayoría de las partículas son eyectadas hacia la parte externa del Sistema Solar ($e \sim 0.85$ hasta $\simeq 1$); el tiempo de vida medio dinámico es del orden de 10 Myr. Una pequeña porción de la muestra, aproximadamente el 5%, alcanza la parte interna del Sistema Solar y sobrevive durante un intervalo de tiempo de 100 Myr con excentricidades e

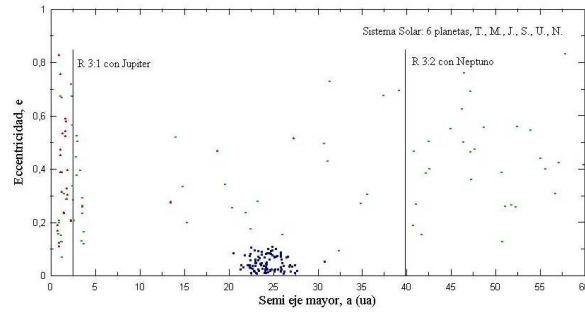


Figura 3. Menos del 5% de los objetos estudiados colisionan con el Sol o los planetas interiores, con e grande.

inclinaciones grandes. Otra fracción de partículas, también pequeña, evoluciona hacia órbitas externas, mas allá del KB; los parámetros orbitales (a , e , i) de estos objetos alcanzan los valores de los cuerpos observados 2000 OO67 y 2003 VB12 (Sedna) i. e., $a \simeq 500$ UA y $e > 0.8$; este resultado podría explicar la existencia de estos planetesimales, los cuales podrían provenir de la región entre las órbitas de Urano y Neptuno cuando tenemos en cuenta la migración de Neptuno; además, varias partículas son capturadas en la resonancia 2:3 con Neptuno (Plutinos). El número de encuentros con los planetas gigantes es grande ($\sim 70\%$ de las partículas). Los encuentros, principalmente con Júpiter y Saturno son los más frecuentes y tienden a eyectar las partículas fuera del Sistema Solar.

Concluimos que la muestra de partículas de prueba estudiadas en nuestras simulaciones tiene una evolución orbital casi caótica en una escala de tiempo menor que 100 Myr, como lo demuestran las grandes variaciones que sufren los parámetros orbitales a y e .

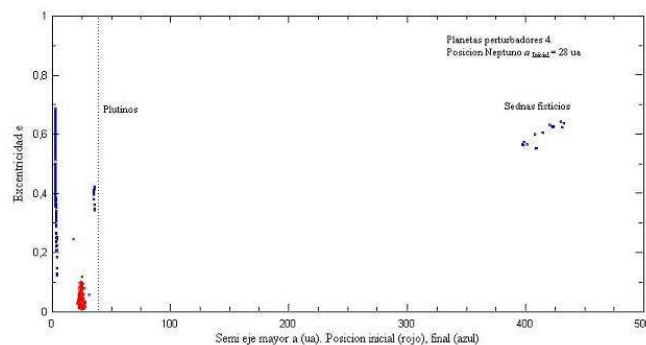


Figura 4. Los puntos a la derecha del gráfico prueban que, con ciertas posiciones iniciales de Neptuno, es posible demostrar la existencia de objetos a una distancia de ~ 500 UA .

Referencias

- Delsanti, A., & Jewitt, D. 2006, *Solar System Update*, 267
- Duncan, M. J., & Levison, H. F. 1997, *Science*, 276, 1670
- Duncan, M. J., Quinn, T., & Tremaine, S. 1987, *AJ*, 94, 1330
- Duncan, M. J., Quinn, T., & Tremaine, S. 1988, *ApJ*, 328, L 69
- Holman, M., & Wisdom, J. 1993, *AJ*, 105, 1987
- Horner, J., Evans, N. W., & Bailey, M. E. 2003, *MNRAS*, 343, 1057
- Horner, J., Evans, N. W., & Bailey, M. E. 2004a, *MNRAS*, 354, 798
- Horner, J., Evans, N. W. & Bailey, M. E. 2004b, *MNRAS*, 355, 321
- Kowal, C. 1989, *Icarus*, 77, 118
- Levison, H., & Duncan, M. 1993, *ApJ*, 406, L35
- Levison, H., & Duncan, M. 1997, *Icarus*, 127, 13
- Levison, H. F., & Morbidelli, A. 2003, *Nature*, 426, 419
- Malhotra, R., Duncan, M. J., & Levison, H. F. 2000, *Protostars and Planets IV*, 1231
- Morbidelli, A. 1997, *Icarus*, 127, 1
- Tiscareno, M. S., & Malhotra, R. 2003, *AJ*, 126, 3122
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., & Levison, H. F. 2005, *Nature*, 435, 459

COMUNICACIÓN DE TRABAJO – CONTRIBUTED PAPER

The role of exploding QSOs in explosive models of evolution, formation and end of galaxies

S. Lípári¹, M. Bergmann², S. F. Sánchez³, R. Terlevich⁴,
E. Mediavilla⁵, B. Punsly, B. Garcia⁵, W. Zheng⁶, Y. Taniguchi⁷,
R. Sisteró

(1) *Observatorio Astronómico de Córdoba and CONICET*

(2) *Gemini Observatory, Chile*

(3) *Calar Alto Observatory, Spain*

(4) *Univ. of Cambridge, UK*

(5) *Inst. de Astrofísica de Canarias, Spain*

(6) *Johns Hopkins Univ., USA*

(7) *Tohoku Univ., Japan*

Abstract. In this work we analyse the role and evidence of exploding BAL + IR + Fe II QSOs, and their relation with new –and previous– explosive models for evolution, formation and end of galaxies.

Resumen. En este trabajo analizamos el rol y evidencia de BAL + IR + Fe II QSO explosivos, y su relación con nuevos –y previos– modelos explosivos para evolución, formación y fin de galaxias.

1. Evolution of galaxies/QSOs and the role of extreme out-flow/BAL

Main current issues in astrophysics (from the theoretical and observational point of view) are the study of the evolution of IR mergers, IR/BAL QSOs, extreme star formation processes and the relations between them. These issues play an important role in practically every scenario of formation and evolution of galaxies and active galactic nuclei (AGNs) (see for references Lípári & Terlevich 2006; Sanders & Mirabel 1996).

On the other hand, there is increasing evidence that extreme galactic out-flows (OF) and BAL systems play a main role at very high redshift ($z > 5.0$), i. e. the young Universe (Frye, Broadhurst, Benítez 2002; Maiolino et al. 2003, 2004; Lípári 1994; Lípári et al. 2005, 2006a,b; Lípári & Terlevich 2006). At low redshift, there is strong evidence of extreme OF, mainly associated with extreme starburst in IR galaxies (like M 82, Arp 220, NGC 5514, NGC 3256, NGC 2623; see for references Heckman et al. 1987, 1990; Lípári et al. 2004a,b,c).

The IRAS colour-colour diagrams have been used as an important tool to detect and discriminate different types of activity in the nuclear/circumnuclear regions of galaxies. Thus, this tool is also important for the study of possible links between different phase of galaxy and QSO evolution. Specifically, Lípári (1994) found that the IR colours (i. e., IR energy distribution) of ~ 10 extreme IR + FeII QSOs are distributed between the power law (PL) and the black-body (BB) regions: i. e., the *transition area*. It is important to remark that of a total of ~ 10 IR transition objects of this original sample, the first 4 systems are BAL IR QSOs. Therefore, we already suggested that BALs IR QSOs (like Mrk 231,

IRAS 07598+6508, IRAS 17002+5153 and IRAS 14026+4341) could be associated with the young phase of the QSO activity/evolution (and the link between IR mergers and standard QSOs).

Very recently, using our data base of more than 50 IR mergers and QSOs with galactic winds and using for comparison the large sample of standard PG QSO (from Boroson & Green 1992) we have expanded our previous study. L ipari et al. (2005; in their Fig. 15) show the IR energy distribution [spectral indexes: $\alpha(60, 25)$ vs. $\alpha(100, 60)$] for IR mergers and IR QSO with GW (originally 51 IR systems). An inspection of this diagram clearly shows the following: (i) All the IR mergers with low velocity OF (LVOF) are located very close to the BB and starburst area. (ii) Almost all the IR QSOs with extreme velocity OF (EVOF) are located in the transition region. (iii) The standard QSOs and radio QSOs are located around the PL region. (iv) All the BAL IR QSOs are located in the transition region, in almost a clear sequence: from Mrk 231 (close to the BB area) \rightarrow IRAS 07598+6508 \rightarrow IRAS 04505–2958 \rightarrow IRAS 21219-1757 \rightarrow IRAS/PG 17072+5153 and IRAS 14026+4341 (close to the PL area) \rightarrow standard QSOs.

These results first confirm our previous finding (obtained from a small sample of IR galaxies): in the sense that IR QSOs are probably young, composite and transition objects (between IR mergers and standard QSOs). Furthermore, in this IR colours diagram a main evolutionary parameter is the value of the out-flow: from IR mergers with low velocity OFs to IR OSOs with extreme velocity OFs.

2. Explosive models for formation and evolution of galaxies/QSOs

The presence of extreme explosions, OF and galactic-winds –associated mostly to extreme/massive star formation processes– is an important component for different theoretical models of galaxy and QSO formation and evolution. More specifically, three main explosive models were already proposed:

1. Ikeuchi (1981) suggested that QSOs were formed and they exploded mainly at the cosmological redshift $z > 4$. The shock waves propagate through the gaseous medium generating cooled shells (at the shock fronts), which are split into galaxies of mass of $10^{10-11} M_{\odot}$.
2. Ostriker & Cowie (1981) have proposed a galaxy formation picture in which (after redshift 100) small seed perturbations are supposed to collapse, giving rise to an explosive release of energy from the deaths of the first generation of stars (Pop. III). This energy drives a blast wave into the surrounding gas, thereby sweeping up a shell of shocked material, which eventually cools. These cool shells are split into galaxies.
3. Berman & Suchkov (1991) proposed a hot/explosive model for galaxy formation. They suggested that the period of major star formation in protogalaxies (or even giant galaxies) is preceded by an evolutionary phase of a strong galactic wind, which is driven by the initial burst of star formation that enriches the protogalaxy with metals. Thus this process reverts from

contraction to expansion. Specifically, the result of this process is the ejection of enriched material from the outer part of the protogalaxy, while the inner part, after a delay of a few Gyr, finally contracts and cools down to form the galactic major stellar component.

From the observational point of view, the presence of multiple concentric expanding supergiant bubbles/shells in young composite BAL + IR + Fe II QSOs, with centre in the nucleus and with highly symmetric circular shape could be associated mainly with giant symmetric explosive events (Lípari et al. 2003, 2005, 2006a,b). In addition, an explosive scenario for the origin of some BAL systems (e.g., in Mrk 231) could explain the SN shape of some BAL light curve variability (Lípari et al. 2005, 2006a,b). These giant explosive events could be explained in a composite scenario/model: where mainly the interaction between the starburst and the AGN could generate giant explosive events. In particular, Artymowicz, Lin, & Wampler (1993) and Collin & Zahn (1999) already analysed the evolution of the star formation (SF) close to super massive black holes (SMBH) and inside of accretion disks. They suggested that the condition of the SF close to the AGNs could be similar to those of the early/first SF events, where giant explosive processes are expected, generated by hypernovae (with very massive progenitors: $M \sim 100 - 200 M_{\odot}$; see Heger & Woosley 2002). In nuclear accretion disks or starburst toroids, the star–gas interactions can lead to a special mode of massive star formation, leading to very powerful SN or hypernova explosions. In order to understand giant explosive outbursts (i.e., from hypernovae, population III stars, etc.), more detailed theoretical and observational studies are required. Very recently, the discovery of the most luminous SN 2006GY (in NGC 1260, Smith et al. 2006) powered by the death of an extremely massive star (like Eta Carinae) and with Type IIn SN properties, strongly supports the existence of extreme explosive events associated with very massive stars.

3. Role/evidence of explosive QSOs and a new explosive model for formation and end of galaxies

New Gemini/GMOS 3D spectroscopic data of young, composite and transition BAL + IR + Fe II QSOs: Mrk 231, IRAS 04505-2958, IRAS/PG 17072+5153, IRAS 07598+6508, IRAS 14026+4341 and IRAS 21219-1757 (Lípari et al. 2006a,b) strongly support the reality of these giant explosive processes.

3.1. The BAL + IR + Fe II QSO: Mrk 231

Using high resolution HST and La Palma/NOT images we detected –for Mrk 231– 4 nuclear expanding superbubbles with radii $r \sim 2.9, 1.5, 1.0,$ and 0.6 kpc, plus a starburst toroid at $r \sim 0.2$ kpc (Lípari et al. 1994, 2005, 2006b). For these bubbles, Gemini/GMOS and La Palma/Integral 3D data ($H\alpha$ velocity field map and 3D spectra) show in the 4 more external bubbles, multiple emission line components with low and high OF velocities, of $\langle V_{OF} \rangle$ low velocity = $[-(100, 400) \pm 30]$, and high velocity $[-(800, 1000) \pm 30]$ km s^{-1} . We suggest that these giant bubbles are associated with the large scale nuclear OF component, which is generated –at least in part– by the extreme nuclear starburst: with giant-SN/hypernova explosions.

In addition, we also found for Mark 231 that the BAL I system could be associated with bipolar out-flows generated by the weak/sub-relativistic jet; and the BAL III system with a supergiant explosive events (L ipari et al. 2005; Punsly & L ipari 2005). The variability of the short lived BAL–III Na I D system was studied, covering almost all the period in which this system appeared (between ~ 1984 – 2004). We found that the BAL–III light curve (LC) is very similar to the shape of a SN LC. Therefore the origin of this BAL–III system was discussed, mainly in the framework of an extreme explosive event.

3.2. The BAL + IR + Fe II QSO: IRAS 04505-2958

L ipari et al. (2005) proposed a *composite hyper-wind scenario* in order to explain the very extended blob/shell (of 30 kpc) found in the new BAL QSO IRAS 04505-2958 (this BAL IR-QSO was discovered using the IR colour-colour diagram, Fig. 15 in L ipari et al. 2005). In particular, we have performed a detailed study of HST images and Gemini GMOS-IFU spectroscopic data of IRAS 04505-2958 (see L ipari et al. 2005; L ipari & Terlevich 2006; see also Magain et al. 2005). In general, we found that IRAS 04505-2958 and Mrk 231 show very similar OF processes and properties. Even both QSOs have “relatively narrow” –or mini/associated– BALs (L ipari et al. 2005, 2006b). They suggested that extreme explosions and extreme starbursts are associated mainly with the interaction between the QSO and the nuclear star formation process.

More specifically, we have studied in detail the OF process and its associated structures, mainly at two large galactic scales: (1) two blobs at radius $r \sim 0.2$ and $0.4''$ (~ 1.1 and 2.2 kpc); and (2) an external super/hypergiant symmetric shell at $r \sim 2.0''$ (11 kpc). In addition, the presence of a very extended hypergiant shell at $r \sim 15''$ (~ 80 kpc) was analysed. From the study of the Gemini data the following main results were obtained: (i) In general the GMOS data show strong emission lines, in almost all the observed GMOS field: $\sim 20 \times 30$ kpc ($\sim 3.5'' \times 5.0''$). Furthermore, multiple emission line systems were detected, in the regions of the shells (which are aligned at PA $\sim 310^\circ$: i.e. suggesting a bipolar OF). These shells also show emission line ratios consistent with an extreme OF process and the associated shocks. (ii) For the two more internal blobs (at $r \sim 1$ and 2 kpc) the GMOS data show that these structures are symmetric shells in expansion, with very similar properties to those detected recently in the supershells of Mrk 231. In particular, a strong blue continuum component was observed in the region of the galactic wind associated with these 2 shells. (iii) For the external supergiant shell at $2.0''$ (11 kpc) all the kinematics GMOS maps of the ionized gas ([O II], [Ne III], [O III], H β , H α) show continuity in velocities between the QSO and this external shell. The GMOS data suggest that this shell is forming a satellite/companion galaxy. (iv) Using the optical GMOS and HST data plus the IR observation of IRAS 04505–2958 we have confirmed that the more probable source of ultra-luminous IR energy is the QSO.

Therefore, we found that these new GMOS data are in good agreement with our extreme OF + explosive scenario, where part of the ISM of the host galaxy was ejected in the form of multiple shells (which could generate satellite galaxies). This extreme OF process detected in IRAS 04505–2958 could be also associated with 3 main processes or steps in the evolution of QSOs and their host galaxies; specifically: (i) to stop the accretion process in SMBHs/QSOs; (ii) the formation

of satellite/companion galaxies by giant explosions; and (iii) to define the final mass of the host galaxy, and even if the explosive nuclear outflow is extremely energetic, this process could disrupt an important fraction (or even all) of the host galaxy. Thus this type of giant QSO explosion is an interesting process in order to consider as the base for a new model of satellite galaxy formation and (a first) model of galaxy end.

Referencias

- Artymowicz, P., Lin, D., Wampler, E. 1993, *ApJ*, 409, 592
Berman, V.G., Suchkov, A. 1991, *Ap&SS*, 184, 169
Boroson, T., Green, R. 1992, *ApJS*, 80, 109
Collin, S., Zahn, J. 1999, *A&A*, 344, 433
Frye, B., Broadhurst, T., Benitez, N. 2002, *ApJ*, 568, 558
Heckman, T., Armus, L., Miley, G. 1987, *AJ*, 93, 276
Heckman, T., Armus, L., Miley, G. 1990, *ApJS*, 74, 833
Heger, A., Woosley, S. 2002, *ApJ*, 567, 532
Ikeuchi, S. 1981, *PASJ*, 33, 211
Lípari, S. 1994, *ApJ*, 436, 102
Lípari, S., Terlevich, R. 2006, *MNRAS*, 368, 1001
Lípari, S. et al. 1994, *ApJ*, 427, 174
Lípari, S. et al. 2003, *MNRAS*, 340, 289
Lípari, S. et al. 2004a, *MNRAS*, 348, 369
Lípari, S. et al. 2004b, *MNRAS*, 354, L1
Lípari, S. et al. 2004c, *MNRAS*, 355, 641
Lípari, S. et al. 2005, *MNRAS*, 360, 416
Lípari, S. et al. 2006a, *BAAA*, 49, 267
Lípari, S. et al. 2006b, *MNRAS*, submitted, (astro-ph 0607054)
Magain, P. et al. 2005, *Nat.*, 437, 381
Maiolino, R. et al. 2003, *ApJ*, 596, L155
Maiolino, R. et al. 2004, *A&A*, 420, 889
Ostriker, B., Cowie, L. 1981, *ApJ*, 243, L127
Punsly, B., Lípari, S. 2005, *ApJ*, 623, L101
Sanders, D., Mirabel, F. 1996, *ARA&A*, 34, 789
Smith, N., et al. 2007, *ApJ*, 666, 1116

Contrastando teorías físicas con la Cosmología

Héctor Vucetich

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

Resumen. Se discute cómo puede la Cosmología aportar información valiosa para contrastar teorías fundamentales de la Física.

1. Introducción

La Cosmología es la ciencia que estudia los objetos más lejanos y ambiguos. Para comprenderlos necesitamos conocer las leyes de la Física, pues sólo a través de ellas inferimos sus propiedades. Éste es el *Principio Galileano*, que constituye uno de los pilares metodológicos de la Cosmología.

Existe una diferencia importante entre Física y Cosmología. La primera estudia objetos accesibles a través de leyes precisas; lo hace en el laboratorio, en condiciones controladas, y las leyes que rigen el comportamiento de estos objetos se contrastan severamente a través del experimento. La Cosmología, por otra parte, es una típica ciencia observacional: lo que estudia (la estructura e historia del Universo como un todo) no está sometido a control ni es repetible: hay que “tomarlo como viene”.

Pero aún hay más: en la última década hemos aprendido que la mayor parte de la materia que forma el Universo no ha sido estudiada en el laboratorio y nuestra indagación del Universo apenas está guiada por el Principio Galileano. Por el contrario: fue necesario introducir la “materia oscura” y la “energía oscura” como violaciones al Principio Galileano para explicar las observaciones.

¿Cómo puede entonces la Cosmología ser usada para contrastar una teoría física? Parece tratarse de un oxímoron, pero en ciertas condiciones puede darse el caso: hay en Cosmología algunos hechos bien establecidos, cuya explicación no depende de las “sustancias oscuras” y también hay teorías cuya contrastación en el laboratorio parece difícil o imposible con las técnicas actuales. Ejemplos de estas teorías son:

1. Las teorías escalares-tensoriales de la Gravitación (Will 1981) tales como la de Brans-Dicke (Brans & Dicke 1961).
2. Las teorías de Kaluza-Klein (Kaluza 1921; Klein 1926) y sus generalizaciones que a su vez pueden ser límites de bajas energías de la Teoría de Cuerdas.
3. Teorías “dilatónicas”, en donde hay campos escalares acoplados directamente a la materia, como las teorías de Bekenstein (Bekenstein 1982; Sandvik et al. 2002), que pueden ser el límite (único, a menos de reformulaciones) de teorías de Kaluza-Klein o de cuerdas.
4. Ciertas teorías de la materia condensada, tal como la Mecánica Estadística no extensiva, desarrollada por Tsallis y colaboradores (Tsallis 1988, Curado & Tsallis 1991).

Estas teorías tienen en común el hecho de que la mayoría de sus predicciones no difieren significativamente de las teorías comúnmente aceptadas [la Relatividad General en los casos 1 y 2 (Vucetich 1996), el Electromagnetismo de Maxwell en 3 (Bekenstein 1982, Bekenstein 2002) y la Mecánica Estadística de Gibbs en 4 (Curado & Tsallis 1991)]. Suele decirse que tales teorías están “protegidas” contra la observación.

En este trabajo, basado principalmente sobre investigaciones llevadas a cabo por el grupo de La Plata, mostramos cómo pueden contrastarse tales teorías protegidas usando hechos cosmológicos. En la sección 2. resumimos algunos de los hechos observacionales usados en este trabajo, en la 3. contrastamos algunas teorías con la observación y en la 4. resumimos las conclusiones científicas y filosóficas del estudio.

2. Hechos observacionales

Los “sólidos hechos observacionales” que confrontaremos con las teorías protegidas son la variación de las constantes fundamentales (subsección 2.1.), el espectro del fondo cósmico de radiación (subsección 2.2.), el correspondiente espectro de fluctuaciones (subsección 2.3.) y la producción primordial de elementos livianos (subsección 2.4.).

2.1. Variación de constantes fundamentales

La variación de constantes fundamentales es una predicción genérica de todas las teorías con “dimensiones extras”, además de las 3 del espacio y 1 del tiempo. Las de Kaluza-Klein y las dilatónicas son prototipos de las mismas, estas últimas límites de bajas energías (menores que la escala de Planck) de las mismas.

La variación temporal de “constantes” es capaz de producir efectos observables, al menos en la aproximación adiabática (Sisterna & Vucetich 1990, 1991; Uzan 2003); por eso han sido estudiadas exhaustivamente. Algunos de ellos son:

- Variación de radios planetarios (detectable mediante el estudio “geológico” de las superficies).
- Cambios en los ritmos de desintegración α y β (detectables estudiando tasas de desintegración “fósiles”).
- Cambios en las energías de resonancia neutrónica (observables en el reactor natural de Oklo).
- Cambios en los espectros atómicos de galaxias distantes.

Dada una de las constantes fundamentales Q , cada una de esas observaciones pone cotas de la forma

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right|_{\Delta T} \leq \epsilon \quad (1)$$

en donde ΔT es el intervalo entre hoy y el momento de observación. Hay un gran número de cotas, y también algunas observaciones positivas, establecidas de esta manera. La tabla 1 muestra resultados para la variación de la constante de estructura fina $\alpha = e^2/\hbar c$.

Estas cotas ponen fuertes vínculos sobre las teorías multidimensionales.

Fenómeno	ΔT (10^9 años)	$\dot{\alpha}/\alpha$ (años^{-1})
Reactor de Oklo ¹	1.8	$(-0.2 \pm 0.8) 10^{-17}$
Edad de la Tierra ²	4.5	$(1.0 \pm 0.8) 10^{-15}$
FS en QAS ³	12.3	$(-0.4 \pm 1.1) 10^{-15}$
MM en QAS ⁴	12.4	$(-0.61 \pm 0.23) 10^{-15}$
HFS H vs Opt in QAS ⁵	11	$(0.32 \pm 0.50) 10^{-15}$
Fluctuaciones de CMB ⁶	15	$(0.0 \pm 1.3) 10^{-12}$

Tabla 1 Algunas cotas a la variación de α . Referencias: (1) Fujii et al. 2000, 2002; (2) Sisterna & Vucetich 1990; (3) Murphy et al. 2001; (4) Webb et al. 2001; (5) Cowie & Songaila 1995; (6) Landau et al. 2001, Martins et al. 2002

2.2. El espectro del Fondo Cósmico de Radiación

El espectro el fondo cósmico de radiación está muy bien medido por el experimento FIRAS del satélite COBE. El espectro es planckiano, con una temperatura $T = 2.730 \pm 0.060$ K. La máxima desviación entre teoría y experimento es

$$\left| \frac{u^{\text{obs}} - u^{\text{teo}}}{u^{\text{max}}} \right| \leq 2.3 \times 10^{-3}. \quad (2)$$

Un apartamiento de la forma planckiana del espectro es difícil de explicar con la física convencional. En cambio, el espectro es sensible a cambios en la física por lo tanto permite confrontar algunas teorías con el experimento.

2.3. El espectro de fluctuaciones del Fondo Cósmico de Radiación

La gran precisión alcanzada en la medición de las fluctuaciones del fondo cósmico de radiación es otra posibilidad para contrastar teoría y experimento en el caso “protegido”. La estructura detectada depende en forma compleja del estado de cuasi-equilibrio termodinámico que dirige la formación del hidrógeno, de las tasas de reacción de recombinación y de otras propiedades sensibles tanto a la estadística como al valor de las constantes fundamentales. Esta última dependencia ha sido estudiada con mucho cuidado (Landau et al. 2001; Martins et al. 2002) y proporciona límites estrictos sobre la variación de varias constantes.

2.4. Nucleosíntesis primordial

Los núcleos livianos (H, D, ³He, ⁴He, ⁷Li) se producen fundamentalmente en los primeros segundos del Universo. El mecanismo de producción se ha estudiado en forma numérica (Kawano 1992) y semianalítica (Esmailzadeh et al. 1991), de modo que se comprende bien la influencia de los procesos térmicos y nucleares. Tanto la variación de las constantes fundamentales como un cambio en la estadística producirían efectos observables en la variación. Pese a que las medidas de las abundancias primordiales están afectadas por importantes errores sistemáticos (Landau et al. 2006), la influencia de estas variaciones es tan importante en el Universo temprano que se pueden poner cotas muy importantes sobre las mismas.

3. Contrastación de algunas teorías

Examinemos ahora algunas de las teorías protegidas para ver cómo pueden contrastarse con datos cosmológicos.

3.1. La teoría BBMS

La teoría de Bekenstein (1982), generalizada ligeramente por Barrow, Magueijo & Sandvik (Sandvik et al. 2002), es una modificación de la teoría electromagnética de Maxwell para incluir una carga elemental variable.

La propuesta de Bekenstein (1982) consiste en modificar la teoría de Maxwell introduciendo un campo ϵ que describe la variación de α . La teoría se basa sobre las hipótesis siguientes (Bekenstein 1982):

1. La teoría debe reducirse a la de Maxwell cuando $\alpha = \text{Cte}$.
2. Las variaciones de α son dinámicas (es decir, generadas por un campo ϵ).
3. Tanto la dinámica del campo electromagnético como la de ϵ se deducen de un principio variacional.
4. La teoría debe ser invariante de gauge local.
5. La teoría debe preservar causalidad.
6. La acción debe ser invariante bajo inversión temporal.
7. La escala de Planck ℓ_P es la más pequeña admisible en la teoría.

La aparición de teorías de cuerdas y afines, en donde hay otras escalas de longitud fundamentales, obliga a dejar de lado la condición 7.

En lo que sigue, despreciaremos las pequeñas variaciones espaciales de α para concentrarnos en la variación cosmológica.

Las condiciones 1 a 7 definen la teoría en forma única: hay un sólo parámetro libre, la *longitud de Bekenstein* ℓ_B , que por la condición 7 debe satisfacer

$$\ell_B \geq \ell_P. \quad (3)$$

La contrastación de la teoría puede hacerse comparando los valores de α observados (p. ej. véase tabla 1) con la predicción de la teoría. Esta última se deduce de la ecuación diferencial

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \simeq f \zeta \Omega_0 \left(\frac{\ell_B}{\ell_P} \right)^2 \frac{t - t_C}{a(t)^3} \quad (4)$$

en donde f , ζ y Ω_0 son constantes conocidas, $a(t)$ es el factor de escala del Universo y t_C una constante de integración. Tanto ℓ_B como t_C deben determinarse a partir de los datos observados.

La figura 1 muestra una comparación de datos observacionales con la teoría (Vucetich 2003). Otros trabajos, con una base de datos más rica, hallan valores aún menores para el cociente ℓ_B/ℓ_P (Landau & Vucetich 2002; Scóccola et al. 2007). No existe forma de reconciliar los datos observacionales con la teoría (lo que sugiere la existencia de errores sistemáticos). Tampoco es posible hallar $\ell_B/\ell_P \geq 1$ sin eliminar importantes datos observacionales.

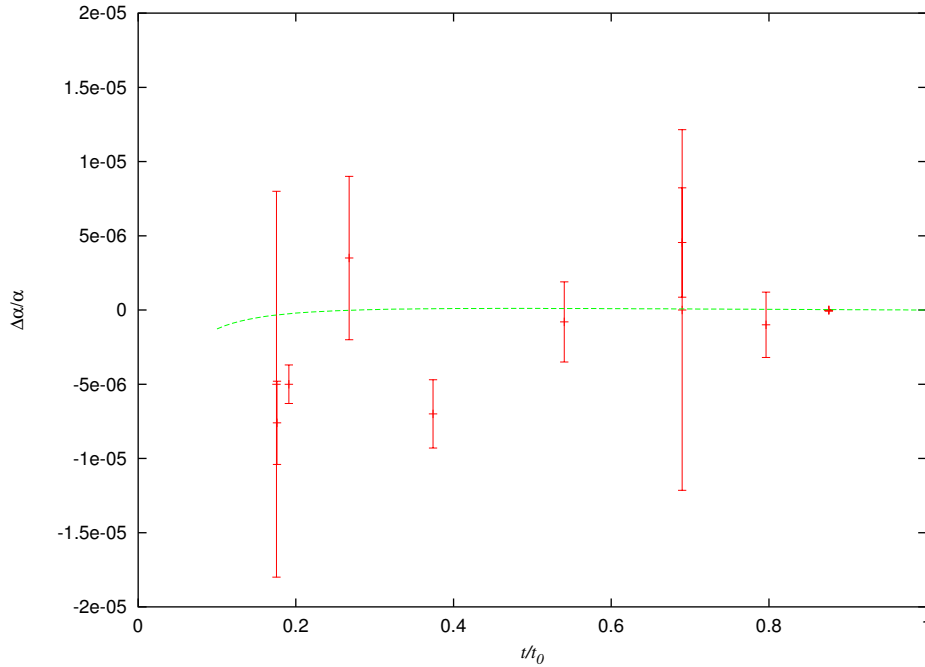


Figura 1. Comparación de datos cosmológicos con la teoría de Bekestein. El “best fit” se hizo por cuadrados mínimos, resultando $\ell_B/\ell_P = 0.15$.

3.2. Termodinámica no extensiva

Tsallis (1988; Curado & Tsallis 1991) propuso una generalización de la Mecánica Estadística de Gibbs basada sobre la siguiente definición de entropía

$$S_q = k_B \frac{\sum_n p_n (1 - p_n^{q-1})}{q - 1} \quad (5)$$

que tiende a la entropía de Gibbs cuando $q \rightarrow 1$. Aquí p_n es la probabilidad estadística del estado de energía ϵ_n . La entropía definida en (5) no es extensiva pues para dos sistemas independientes A y B

$$S(A+B) = S(A) + S(B) - (q - 1)S(A)S(B) \neq S(A) + S(B). \quad (6)$$

Pero si se define la energía interna en la forma

$$U = \sum_n p_n^q \epsilon_n \quad (7)$$

se recupera la estructura completa de la termodinámica (Curado and Tsallis 1991).

Las ecuaciones (5) y (7) son *axiomas de la teoría*. Por lo tanto su validez debe establecerse comparando sus consecuencias con el experimento y no por vagos sentimientos de disgusto que inspire su apariencia. Sin embargo, esto es más

fácil decirlo que hacerlo ya que la teoría está protegida: cercana a la de Gibbs, las vaguedades de los sistemas “reales” enmascaran las propiedades fáciles de estudiar en sistemas “ideales”. Una excepción es la medida de alta precisión de la constante de Stefan-Boltzmann (Cohen & Taylor 1987)

$$\sigma_{\text{obs}} = 5.66959(76) \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (8)$$

mientras que el valor calculado con los valores ajustados independientemente de la constante de Planck \hbar , el número de Avogadro N_A y la constante de los gases R es (Cohen & Taylor 1987)

$$\sigma_{\text{cal}} = \frac{\pi^2}{60 \hbar^3 c^2} \left(\frac{R}{N_A} \right)^2 = 5.57051(19) \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}. \quad (9)$$

Se prueba que la diferencia entre ambas formas de estadística es (Plastino et al. 1995)

$$\frac{\sigma_q - \sigma_G}{\sigma} = 40.02 (q - 1) \quad (10)$$

y si se atribuye toda la discrepancia a la diferencia de estadísticas se encuentra

$$|q - 1| \leq 0.7 \times 10^{-4}. \quad (11)$$

El espectro de energías del fondo cósmico de radiación permite poner una segunda cota al parámetro de Tsallis $q - 1$. La comparación de la cota (2) con las correcciones al espectro del cuerpo negro (Tsallis et al. 1995) permite concluir que

$$|q - 1| \leq 5.3 \times 10^{-4}. \quad (12)$$

Las ecuaciones anteriores constituyen una fuerte contrastación de la extensividad, pues se comparan los resultados obtenidos en escalas de laboratorio y cósmica. En la referencia (Hamity & Barraco 1996) sobre la base de que la aplicación de la termodinámica en estos contextos es estrictamente local, lo que impide una detección de la no extensividad. El análisis de la producción de ${}^4\text{He}$ parece no tener estos problemas.

Del análisis esquemático del proceso se deduce que (Torres et al.(1997)

$$|q - 1| \leq 2 \times 10^{-5}. \quad (13)$$

Puesto que la medición de Y_4 proviene de un volumen de gas mezclado en la galaxia, mientras que nuestra estimación de q proviene de un volumen del orden del horizonte en la época de nucleosíntesis, este resultado evita las objeciones de la referencia (Hamity and Barraco 1996).

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos mostrado que es posible contrastar teorías protegidas con la naturaleza a través de sus predicciones cosmológicas. Si bien el método puede aplicarse sólo a familias restringidas de teorías físicas, éstas pertenecen a algunas de las más interesantes: las que intentan unificar la gravitación con el resto de las interacciones conocidas (y tal vez con otras aún desconocidas).

El método, sin embargo, es limitado. Por ejemplo, la cota más estricta sobre el parámetro de Tsallis, ecuación (11) proviene de un experimento de laboratorio, mientras que la comprobación más controlada de la extensividad proviene de otro (Martínez et al. 2001).

Así pues, el estudio de modelos cosmológicos, a pesar de sus limitaciones metodológicas, ofrece una poderosa herramienta para contrastar teorías físicas protegidas e imponer límites sobre algunos de sus parámetros. Por el momento, es la única mirilla por donde podemos espiar lo que ocurre en la más misteriosa de las escalas: la que fija la longitud de Planck ℓ_P .

Referencias

- Bekenstein, J. D. 1982, Phys. Rev. D, 25, 1527
 Bekenstein, J. D. 2002, Phys. Rev. D, 66, 123514
 Brans, C. H., & Dicke, R. H. 1961, Phys. Rev., 124, 925
 Cohen, E. R., & Taylor, B. N. 1987, Rev. Mod. Phys., 59, 1121
 Cowie, L. L., & Songaila, A. 1995, ApJ, 453, 596
 Curado, E. M. F., & Tsallis, C. 1991, J. Phys. A, 24, L69 (Corrigenda: *ibid.*, 24, 3187 (1991); *ibid.* 25, 1019 (1992)
 Esmailzadeh, R., Starkman, G. D., & Dimopoulos, S. 1991, ApJ, 378, 504
 Fujii, Y., et al. 2000, Nucl. Phys., B573, 377
 Fujii, Y., et al. 2002 (hep-ph/0205206)
 Hamity, V. H., & Barraco, D. E. 1996, Phys. Rev. Lett, 76, 25
 Kaluza, T. 1921, Stz. Preuss. Akad. Wiss. Phys. Math., K1, 966
 Kawano, L. 1992, Technical report, Fermilab, FERMILAB-PUB-92-004-A
 Klein, O. 1926, Z. Phys., 37, 895
 Landau, S. J., Harari, D. D., & Zaldarriaga, M. 2001, Phys. Rev. D, 63, 083505
 Landau, S. J., Mosquera, M. E., & Vucetich, H. 2006, ApJ, 637, 38
 Landau, S. J., & Vucetich, H. 2002, ApJ, 570, 463
 Martínez, S., Pennini, F., Plastino, A., & Vucetich, H. 2002 Phys. Lett. A, 302, 59
 Melchiorri, A., Trotta, R., Bean, R., Rocha, G., Avelino, P. P., & Viana, P. T. 2002, Phys. Rev. D, 66, 023505
 Murphy, M. T., Webb, J. K., & Flambaum, V. V. 2003, MNRAS, 345, 609
 Plastino, A. R., Plastino, A., & Vucetich, H. 1995, Physics Letters A, 207, 42
 Sandvik, H. B., Barrow, J. D., & Magueijo, J. 2002, Phys. Rev. Lett, 88, 031302
 Scóccola, C., Mosquera, M., Landau, S., & Vucetich, H. 2007, (en preparación)
 Sisterna, P., & Vucetich, H. 1990, Phys. Rev. D, 41, 1034
 Sisterna, P., & Vucetich, H. 1991, Phys. Rev. D, 44, 3096
 Torres, D. F., Vucetich, H., & Plastino, A. 1997, Physical Review Letters, 79, 1588
 Tsallis, C. 1988, J. Stat. Phys., 52, 479
 Tsallis, C., Sá Barreto, F. C., & Loh, E. D. 1995, Phys. Rev. E, 52, 1447

- Uzan, J. P. 2003, *Rev. Mod. Phys.*, 75, 403
- Vucetich, H. 1996, *Bol. Acad. Nac. Cs. (Córdoba)*, 61, 4
- Vucetich, H. 2003, *AIP Conf. Proc.*, 670, 298
- Webb, J. K., Murphy, M. T., Flambaum, V. V., Dzuba, V. A., Barrow, J. D., Churchill, C. W., Prochaska, J. X., & Wolfe, A. M. 2001, *Physical Review Letters*, 87, 091301
- Will, C. M. 1981, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge-London