

Rafael Cid: su obra científica

ANTONIO ELIPE

Grupo de Mecánica Espacial. Universidad de Zaragoza

La Astronomía, una de las Ciencias más antiguas que existen, es también una de las que más ha avanzado en los últimos años. Basta con estar un poco atento a las noticias para darse cuenta de que continuamente aparecen nuevos descubrimientos relevantes, como el hallazgo de sistemas planetarios alrededor de estrellas, nuevas galaxias, explosiones de supernovas, por no mencionar el tan traído problema de cómo es el Universo, si está en expansión, si habrá un momento en que la expansión cesará y empezará a contraerse, etc.. Todos estos descubrimientos aportan su contribución a un mayor conocimiento del mundo en que nos encontramos y en los últimos años, se están dando pasos de gigante con la construcción de modernos telescopios, cada vez de mayor tamaño, llegando a construirse auténticos gigantes, como el GRANTECAN (Gran Telescopio de Canarias) de 10 metros de diámetro, o mediante la puesta en órbita de telescopios, consiguiendo precisiones en la medida y calidad de imágenes que difícilmente se alcanzarían desde la superficie terrestre. España está en la primera línea de estas investigaciones, participando con su cielo, sus modernos observatorios y en proyectos espaciales a través de la ESA (Agencia Espacial Europea), pero también participa, y de un modo muy significativo, con sus astrónomos, que gozan de un gran prestigio internacional.

La Astronomía que hoy está en las noticias es fundamentalmente Astrofísica y su desarrollo ha sido tan espectacular, que prácticamente se tiende a identificar (o a confundir, en ocasiones)

Astrofísica con Astronomía (designando el todo por la parte). Sin embargo, existen parcelas de Astronomía que no son propiamente Astrofísica, pero que ésta necesita. Podemos mencionar, por ejemplo, la *Astrometría*, que consiste en proporcionar las coordenadas y distancias de los astros lo más exactamente posible; la *Rotación de la Tierra*, imprescindible para definir un sistema de coordenadas apropiado; el cálculo de *Efemérides* que proporciona las coordenadas de estrellas, planetas, etc. para cada día del año; la medida del *Tiempo*, no solamente necesario en Astronomía, sino esencial para la vida ordinaria, donde se necesita poder medir con precisión fracciones muy pequeñas de segundo ¹; la *Mecánica celeste*, que estudia el complejo movimiento de planetas, satélites, asteroides, anillos de planetas, cometas, etc. y por supuesto, las órbitas de astros que no pertenecen a nuestro sistema solar, como son las *Estrellas dobles*, y objetos puestos en el espacio por el hombre, los *satélites artificiales*. Pues bien, estas ramas de la Astronomía suelen ser desconocidas por el público en general, pero tienen un gran interés científico y resultan imprescindibles a otras áreas de la Astrofísica, si bien los avances que se hacen, rara vez son objeto de los titulares de los periódicos. Para darnos una idea de su importancia, podemos mencionar que la IAU (Unión Astronómica Internacional) ha agrupado las distintas parcelas de la Astronomía en 4 Divisiones, y que a las áreas de estudio anteriores les ha asignado el nombre de *División I: Astronomía Fundamental*.

El que España se encuentre en el grupo cabecero mundial en el campo de la Astronomía, no es por casualidad, sino que es consecuencia de la labor continuada, con gran esfuerzo, entusiasmo y ausencia casi total de medios materiales, de científicos de una generación anterior. No podemos caer en la tentación de comparar los currículos de estos investigadores con los actuales sin

¹para los escépticos, les recordamos que si su ordenador personal “va” a 500 Mhz, quiere decir que el procesador es capaz de dar 500 millones de vueltas en un segundo, por lo que se requiere una precisión de 5×10^{-9} segundos.

tener en cuenta la precariedad de medios materiales de investigación, que los viajes a congresos, al igual que publicar en revistas extranjeras, eran totalmente prohibitivos y tenían que correr a cargo de la economía particular, que normalmente era tan mermada que era frecuente el tener que completar el escaso salario con clases particulares, traducciones de libros o escritura de textos de Bachillerato. Uno de estos científicos abnegados, es la persona objeto del presente volumen, quien ha desarrollado prácticamente toda su labor científica en la Universidad de Zaragoza, realizando grandes aportaciones al desarrollo de la Astronomía (precisamente en las áreas fundamentales reseñadas anteriormente) y que ha dejado las bases científicas para que sus alumnos pudieran seguir su estela, solo que ahora con muchos mayores medios. Nos estamos refiriendo a RAFAEL CID PALACIOS.

El 22 de octubre de 1918 nace en Vigo Rafael Cid Palacios. En esta misma ciudad cursa con gran brillantez el Bachillerato, que finaliza en junio de 1936, y justo un mes más tarde comienza la guerra civil. A las penurias de una contienda bélica se le añade el que su padre, Maestro Nacional, es separado del Cuerpo por sus ideas políticas, y en agosto de 1937 es movilizado como soldado de Sanidad, ingresando en un cuartel de La Coruña. Posteriormente, ingresa en el Cuerpo de Farmacia Militar y, al finalizar la guerra, a petición propia, es destinado a Madrid. Aquí se matricula como alumno libre en la Facultad de Ciencias (Sección de Exactas), finalizando sus estudios de Licenciatura en 1944, mientras completa sus estudios de Peritaje Mercantil.

Al mismo tiempo que cursaba como alumno libre los últimos años de la Licenciatura y los de Doctorado, daba clases de distintas materias para la preparación a ingreso en Escuelas de Ingeniería y de Peritaje Mercantil en la Academia Cid que había creado con varios de sus hermanos.

A través de un compañero de carrera, Ángel Docobo, conoce

a Don Ramón María Aller Ulloa, sacerdote, director del Observatorio Astronómico, Catedrático Extraordinario de la Universidad de Santiago y un especialista autodidacta, pero de prestigio internacional en el estudio de estrellas dobles y el gran impulsor de la Astronomía en España a mediados del siglo xx. En esa época investigaron con Don Ramón, Rafael Cid, el ya mencionado Ángel Docobo, José Pensado (que fue director del Observatorio Astronómico de Madrid), Enrique Vidal Abascal (catedrático de Geometría en la Universidad de Santiago) y Antonia Ferrín (profesora en la Universidad Complutense). Bajo la dirección de Don Ramón, Rafael Cid realiza su tesis doctoral titulada “Contribución al estudio de estrellas dobles visuales”, que posteriormente fue apadrinada por Don Esteban Terradas y defendida en la Universidad Central de Madrid en junio de 1948, como era preceptivo en aquella época.



Figura 2.—Rafael Cid (dcha.) con Don Ramón M. Aller (centro) y Enrique Vidal Abascal (izda.) en Santiago, 1951.

En el Observatorio de Santiago pasa tres años (1946–49), los dos últimos con el título oficial de *Observador*², hasta que consigue

²En el libro de incidencias del Observatorio, don Ramón Aller escribe de su

un mejor empleo, pero sin abandonar la Astronomía y siguiendo ligado científicamente al Observatorio de Santiago³.

Una vez alcanzado el título de Doctor, las salidas profesionales en el campo de la Astronomía se reducían al ingreso como Astrónomo en el Observatorio Astronómico de Madrid, o bien opositar a Cátedras de Universidad. Como en aquellos momentos no existía vacante en ninguna de ambas posibilidades, prepara oposiciones al cuerpo de Meteorólogos, asimilados a Oficiales del Ejército del Aire. En 1948 gana por oposición una plaza de Meteorólogo Facultativo y es destinado provisionalmente en el aeropuerto de Labacolla (Santiago de Compostela) y con destino definitivo en el de Gando (Las Palmas de Gran Canaria). En 1952, solicita una vacante en el aeropuerto de Zaragoza, dado que en la Universidad de Zaragoza existía la única cátedra vacante de Astronomía. Su vocación universitaria le lleva a la Facultad de Ciencias, donde compagina su labor como meteorólogo con el desempeño de los puestos de Profesor Ayudante de Física Matemática, de Mecánica Teórica, Profesor Encargado de Geometría 1º, Profesor Adjunto interino de Geometrías 3º y 4º y Profesor Ad-

puño y letra: 1947.- 20 de octubre.- Sesión del Consejo Ejecutivo del Superior de Investigaciones Científicas. Se nombra "Observador" del Observatorio de Santiago con la asignación de 5.000 ptas. anuales a D. Rafael Cid Palacios (pág. 24). Más adelante, en la página 45, dice D. Ramón: A mediados de noviembre de 1949 se vio precisado a dejar el Observatorio el Dr. D. Rafael Cid Palacios por haber sido destinado a prestar sus servicios como Meteorólogo del Ejército del Aire en Canarias

³... Desde el 20 de octubre fecha de este nombramiento, trabajó asiduamente logrando terminar la tesis doctoral sobre órbitas de estrellas dobles. Pero, coincidiendo casi con la terminación, se presentaron las oposiciones al Cuerpo de Meteorólogos, y allí se fue a desempeñar el cargo obtenido por oposición. La distancia impidió conservarle como observador en Santiago, pero la Astronomía hizo presa de sus admirables facultades, y continúa trabajando, como se verá en las publicaciones del Observatorio, que le considera como corresponsal destacado., en R. M. Aller: (1954), "Observatorio Astronómico de la Universidad de Santiago. Actividades-Programa-Proyectos" *Urania* **237**, 69-86.

junto interino de Astronomía. Por último, en junio de 1957 gana la oposición de Catedrático de *Astronomía General y Topografía y Astronomía Esférica y Geodesia* de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza, y desde entonces, su dedicación ha sido total a esta Universidad.

Como miembro de la comunidad universitaria, ha colaborado en el funcionamiento de la misma participando en tareas administrativas; así, fue nombrado Vicedecano de la Facultad de Ciencias (mayo de 1967 a julio de 1968) y Decano de la Facultad (julio de 1968 a marzo de 1972), años de especial dificultad política en la Universidad española. En 1973, el Rector Agustín Vicente Gella le encarga la dirección del Instituto de Ciencias de la Educación (ICE), de reciente creación. Bajo la dirección del Profesor Cid, el ICE cobra dinamismo y se embarca en tareas formativas del profesorado de Enseñanzas medias y universitarias. Una vez que el ICE estaba consolidado, tanto en medios como personal, cesa a petición propia en 1979. Otra labor administrativa, pero ya más enmarcada en tareas científicas, fue su nombramiento como Director del Departamento de Física de la Tierra y del Cosmos (desde el año 1967 hasta la jubilación en 1986).

Su actividad docente, no sólo se ceñía a las asignaturas propias de su especialidad, sino que debido a la ordenación académica entonces vigente, hubo de impartir clases de Matemáticas Generales y Cálculo Infinitesimal, dedicadas a los alumnos de primeros cursos de Ciencias, y en particular el entonces llamado *Curso Selectivo*, que era un curso común a todas las especialidades de Ciencias y alguna Ingeniería, y que era requisito el tenerlo completamente aprobado para poder pasar al curso siguiente. De aquellas épocas le viene el apodo que con cierto orgullo le gusta todavía recordar: “*El Cid Cateador*”. Impartió prácticamente todas las asignaturas específicas; así, encontramos cursos de Astronomía General y Topografía, Astronomía y Geodesia, Física de la Atmósfera, Astrofísica, Mecánica y Astronomía, Mecánica Celeste y Topografía y

Geodesia, todos ellos de Licenciatura, y que se daban por primera vez en la Universidad, por lo que el esfuerzo de elaborar tantos programas diferentes y que fueran coherentes fue muy importante.

En lo que respecta a estudios del tercer ciclo, ha impartido 25 cursos de doctorado, todos ellos en estrecha relación con su investigación, como por ejemplo, Figura de cuerpos celestes, Cálculo de órbitas de estrellas dobles, Teoría de pulsación de estrellas, Problema de n cuerpos, Teoría de perturbaciones, Perturbaciones de satélites artificiales, Técnicas de optimización de órbitas, Cálculo de órbitas de satélites artificiales, Sistemas de programación en ordenadores, Cálculo automático, Teoría de perturbaciones, Cálculo de órbitas de sistema estelares dobles o triples, Cálculo de eclipses de Sol, Transformaciones canónicas, Movimiento de n sólidos, Dinámica de sólidos rígidos, etc.

Una preocupación constante del Profesor Cid Palacios ha sido el elaborar apuntes de las asignaturas que impartía. Esta ingente labor tuvo en algunas ocasiones la recompensa de pérdidas económicas. La motivación de elaborar apuntes era doble. Por un lado, el que los alumnos dispusiesen de un texto escrito con los contenidos de la asignatura, y el segundo objetivo era el dejar un programa muy elaborado, autocontenido, que sirviese de pauta a los profesores que impartirían estas asignaturas después que él. Quienes nos hemos beneficiado, tanto como alumnos como ya posteriormente de profesores, de estos apuntes, reconocemos con gratitud el tremendo esfuerzo que Don Rafael hizo.

El modo de escribir del Profesor Cid es claro, con mucho rigor y conciso. El honor a la verdad, quizás demasiado conciso, pues a veces, una demostración de un par de líneas en sus apuntes, nos llevaba algún folio de desarrollos. Sus apuntes también eran muy cuidados en la presentación, procurando elaborarlos (él mismo los mecanografiaba) con los mejores medios del momento. Así, llegó a emplear una máquina de escribir de doble teclado (latino



Figura 3.—Don Rafael Cid, circa 1980.

para el texto y griego para las fórmulas y símbolos matemáticos), después con máquina de escribir eléctrica de cabeza (y margarita) intercambiable. Con la llegada de los primeros ordenadores personales se simplificó la tarea mecánica, pero le llevó a aprender nuevas técnicas, como por ejemplo \LaTeX , estando ya jubilado.

Algunos de sus apuntes han sido la base sobre la que ha elaborado libros de texto, así, tenemos

1. J. M. Íñiguez Almech y R. Cid Palacios (1965): *Mecánica Teórica*. Editorial Dossat S. A.. Madrid. Dos volúmenes. Págs. XXII + 808.
2. R. Cid Palacios (1970): *Curso de Astronomía*. Editado en la Facultad de Ciencias de Zaragoza. Zaragoza. Págs. IV + 162.
3. R. Cid Palacios y V. Camarena Badía (1978): *Curso de Mecánica*. Editado en la Facultad de Ciencias de Zaragoza. Zaragoza. Págs. VI+232.

4. R. Cid Palacios (1979): *Curso de Mecánica Celeste*. Editado en la Facultad de Ciencias de Zaragoza. Zaragoza. Págs. IV + 185.
5. R. Cid Palacios (1985): *Curso de Geodesia: Geodesia Geométrica y teorías auxiliares*. Publicado por el Servicio Geográfico del Ejército. Madrid. Págs. VIII + 262.
6. Y. Lana-Renault y R. Cid (1991): *On the Problem of the internal constitution of the Earth*. Monografía n°4 de la Academia de Ciencias de Zaragoza. Zaragoza. 158 págs.
7. R. Cid Palacios y S. Ferrer Martínez (1999): *Geodesia Geométrica, Física y por Satélites*. Instituto Geográfico Nacional. Madrid. Págs. XXV + 565.

Alguno de estos títulos han sido un referente en la literatura científica nacional, bien por la ausencia de este tipo de textos en español, bien por la novedad de los temas tratados. Así, podemos mencionar, a modo de ilustración, los capítulos en el volumen II de *Mecánica Teórica* dedicados al movimiento del satélite artificial. Recordemos que esta obra aparece en 1962, y que el primer satélite, el soviético Sputnik, fue lanzado en 1957. La última obra, *Geodesia Geométrica, Física y por Satélites* es también pionera en el análisis de la geodesia espacial, con un detallado análisis de misiones espaciales como las TOPEX/POSEIDON y los satélites GPS.

Su inquietud por acercar la Ciencia a un público menos especializado le ha llevado a ser invitado para dictar numerosas conferencias de divulgación en distintas instituciones culturales, Colegio Mayores, Asociaciones astronómicas, así como a participar en varios Cursos y Unversidades de Verano, donde ha hablado de temas astronómicos y astronáuticos, de un modo inteligible para la audiencia, a pesar de que los temas eran punteros en la Ciencia

actual del momento. Como reconocimiento a su continuo apoyo y disponibilidad, la *Asociación Astronómica Aragonesa* le nombró “Socio Honorífico”.

Por su labor científica, también ha recibido diferentes menciones, así, podemos citar entre las más sobresalientes los nombramientos de “Consejero Adjunto” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en 1966, miembro numerario de la Unión Astronómica Internacional en 1970, miembro de la Comisión Nacional de Astronomía en 1970, “Asociado de Honor” de la Asociación Española de Ingenieros Geógrafos en 1970, “Miembro Honorario” de la Sociedad Española de Astronomía desde su fundación. En 1982, fue seleccionado por la Comisión 7 (Mecánica Celeste) de la Unión Astronómica Internacional como uno de los 20 expertos mundiales para el “Advising Commitee”.

Una vez jubilado como Catedrático, en 1987 la Universidad de Zaragoza lo nombró Profesor emérito, cargo académico desde el que ha participado activamente en las tareas docentes e investigadoras de la Universidad, mediante la impartición de cursos de doctorado, y dirigiendo en este periodo 4 Tesis Doctorales.

La Academia de Ciencias Exactas, Naturales, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza lo eligió Académico por la Sección de Exactas en 1958. Tras una larga demora, únicamente atribuible a su natural modestia, leyó el Discurso de Ingreso en 1979. El título de su discurso fue “*Cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales*”, precisamente el tema con el que comenzó su investigación, y que retomó con objeto de su discurso, llevándolo a publicar varios artículos y varias tesis doctorales. Desde 1986 en que fue nombrado Editor de la Revista de la Academia de Ciencias de Zaragoza, la ha revitalizado, manteniendo la periodicidad de la misma, y ampliando las publicaciones con la serie de Monografías de la Academia. Esta Revista se intercambia con más de un centenar de publicaciones internacionales.

Es hora ya de que nos centremos en la investigación desarrollada por el Profesor Cid Palacios, de la que hay que destacar no solamente la suya particular (siendo en ocasiones el primer autor español en publicar en algunas de las revistas científicas de su especialidad, de reconocido prestigio internacional y la presentación de más de 50 comunicaciones en Congresos nacionales e internacionales), sino que también es digno de resaltar la fuente de ideas que supone la dirección de Tesis de licenciatura (8) y doctorales (20), varias de las cuales obtuvieron Premio Extraordinario de doctorado.

Como ya hemos dicho, una vez seguidos los cursos de doctorado en la Universidad de Madrid, entra en contacto con Don Ramón María Aller y Ulloa, Catedrático Extraordinario de la Universidad de Santiago de Compostela, especialista en estrellas dobles. Éste le propone el realizar su tesis doctoral sobre métodos de cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales. Aunque el tema de estrellas dobles será tratado más adelante en esta obra por el Profesor Docobo, digamos que una estrella doble es un conjunto de dos estrellas que se mueven la una alrededor de la otra según el problema de dos cuerpos, es decir, de modo análogo a como un planeta se mueve alrededor del Sol. Sabemos que la órbita de un planeta es una elipse que viene determinada por el semieje mayor a y la excentricidad e , un número entre 0 y 1, de modo que para $e = 0$ se trata de una elipse, y según aumenta e , la elipse se va volviendo más achatada. Cuando $e = 1$, la curva se convierte en una parábola, y si la excentricidad es $e > 1$, la curva es una hipérbola. Como la órbita es una curva plana, hace falta situar este plano en el espacio, con respecto a un sistema de ejes, como por ejemplo el sistema eclíptico (el plano xy es el plano de la eclíptica). El plano orbital corta al plano xy en una línea, llamada de los nodos; pues bien, la posición del plano de la órbita viene determinada por la inclinación i de este plano con respecto al plano xy y por el ángulo Ω (llamado ángulo del nodo) que forma esta línea de los nodos con

el eje x . Una vez conocido el tamaño (a) de la órbita, el tipo de cónica que es (e), la posición del plano orbital en el espacio (i y Ω), hace falta determinar la posición de la órbita en su plano orbital. Para ello, se toma un punto de ella (habitualmente el periastro, es decir cuando los dos astros están lo más cerca posible) y se calcula el ángulo ω que forma la línea del nodo con la dirección del periastro. Por último, solo queda por fijar la órbita en el tiempo, para ello, hace falta saber cuando (T) se encuentra el astro en un punto de su órbita, que suele tomarse el periastro. Así pues, la órbita de un planeta está caracterizada por los seis elementos ($a, e, i, \Omega, \omega, T$), que reciben el nombre de elementos orbitales.

Ya Kepler en su Tercera Ley probó que para los planetas, *los cubos de los semiejes son proporcionales a los cuadrados de los periodos*, por lo que conocido el periodo P se conoce el semieje mayor a . En realidad, esta ley no es el todo exacta, sino que dice que $\mathcal{G}(m_{\odot} + m) = a^3/P^2$, siendo \mathcal{G} la constante de gravitación universal y m_{\odot} , m las masas del Sol y del planeta. Sin embargo, sucede que la masa del planeta es muy pequeña con respecto al Sol, y esta masa se puede calcular por ciertos procedimientos. Pero en el caso de estrellas dobles, sus masas son desconocidas, pero por lo anterior, si supiéramos el periodo P orbital equivaldría a conocer la suma de la masa de las dos estrellas. Por ello, el disponer con precisión de la órbita es un modo de “pesar” las estrellas. Así, a los seis elementos anteriores hay que añadir el periodo.

Las estrellas dobles visuales son aquéllas que se pueden ver separadas con un telescopio. Los datos de observación son el instante en que se hace la observación y dos ángulos, la llamada *distancia angular* ρ , que es el ángulo con que vemos separadas las dos estrellas, y el ángulo de posición θ que forma una estrella con respecto a una dirección fija, es decir, se trata de unas coordenadas polares. Así pues, los datos de observación de estrellas dobles visuales son ternas del tipo (ρ, θ, t) . El problema del cálculo de órbitas consiste en determinar los **siete** elementos orbitales anteriores a partir de

un conjunto de observaciones. Ha de reseñarse que los datos de observación no corresponden a ángulos sobre la órbita (llamada órbita relativa), sino que corresponden a la proyección de ésta sobre el plano perpendicular a la visual, y que por eso se le denomina *órbita aparente*.

Hay numerosos métodos en la literatura, pero casi todos requieren el manejo de todas las observaciones y un cuidadoso trabajo de ajuste y aproximaciones hasta conseguir la órbita deseada. La principal contribución de la tesis de Cid fue el determinar la órbita mediante el empleo de desarrollos en serie de Fourier (sumas cuyos sumandos son senos y cosenos de una cierta variable). A pesar de que hay que realizar cálculos laboriosos, su principal ventaja es que esos mismos desarrollos pueden volver a emplearse para la corrección de la órbita, una vez que se ha determinado una órbita preliminar. Estos resultados fueron publicados, con alguna mejora posterior en la Revista de Geofísica (1950a, 1950b).

En colaboración con Don Ramón Aller dirige su primera tesis doctoral, la de Juan Antonio Zaera de Toledo (1962) quien realiza diversas comparaciones de métodos de cálculo de órbitas y aplicándolos a varios pares.

Sin embargo, tal como señalaba Enrique Vidal Abascal⁴ en 1953, “*El problema matemático de determinar la órbita elíptica de una estrella doble a partir del número preciso de observaciones, está sin resolver. . .*”. Pues bien, Cid aborda este difícil problema y lo resuelve en su artículo publicado en 1958 en el *Astronomical Journal*. En efecto, en este trabajo prueba que es posible el determinar los siete elementos orbitales mediante 3 observaciones completas (ρ_i, θ_i, t_i) ($i = 1, 2, 3$) y una incompleta $(-, \theta_4, t_4)$. Aparte del indudable valor matemático de esta demostración, desde un

⁴E. Vidal Abascal: *Cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales*. Monografías de Astronomía y Ciencias afines. No. 1. CSIC (1953) Santiago.

punto de vista práctico, este nuevo método simplificaba poderosamente los cálculos necesarios.

Una vez probado que con 3 distancias angulares y un ángulo de posición podía calcularse la órbita, el siguiente paso era ver que también podía hacerse lo mismo con otros 7 datos cualesquiera. Esto constituyó la tesis de Miguel Liso (1962), quien lo probó con 2 distancias y 5 ángulos y con una distancia y 6 ángulos. Este método de Cid fue la base que utilizó posteriormente para obtener analíticamente órbitas parabólicas e hiperbólicas en años inmediatamente posteriores.

En esta época también publica un par de artículos sobre el cálculo de eclipses, aunque pronto iba a cambiar drásticamente de tema de investigación. Sin embargo, como suele ocurrir, el primer tema de investigación no se suele olvidar y varios años más tarde lo retoma con nuevas energías y una más amplia visión, acrecentada por la experiencia. En su Discurso de ingreso en la Academia de Ciencias hace una síntesis de los métodos de cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales, así como de varios métodos de corrección y mejora. Esta toma de contacto, tras munerosos años, le lleva a dirigir tres tesis, la de Carlos Osácar (1989), con una gran dosis de mecánica celeste y empleo de métodos de perturbaciones, la de Ederlinda Viñuales en 1993, donde se obtiene un método en las llamadas *variables universales* que es válido para cualquier tipo de órbita, y por último la de Concepción Longás (1993) con nuevos métodos de mejora y corrección de órbitas. Así mismo, como consecuencia de estas tesis, publica una serie de artículos.

Pero, sin duda, la principal aportación científica del Profesor Cid surge a partir de 1957, en que es puesto en órbita el primer satélite artificial. Rápidamente se da cuenta de que se abren nuevas líneas de investigación, con aplicaciones inmediatas y que no iban a permitir demoras. Por otra parte, esos años coinciden también con el nacimiento y desarrollo de los primeros ordenadores.

En 1960 participa en unos cursos de IBM sobre programación, y consigue, tras numerosas gestiones, que la Caja de Ahorros de Zaragoza donase a la Universidad de Zaragoza un *monstruo*, un ordenador BM 1620, lo que supuso un avance revolucionario en los cálculos. Fue el Profesor Cid quien primero impartió cursos de FORTRAN en la Universidad de Zaragoza a los pocos investigadores que se atrevían a tomar contacto con este ordenador.

Ya había empezado a profundizar en temas de Mecánica celeste, y así, publica en 1957 un artículo muy conciso y sistemático sobre el problema de tres cuerpos, generalizando de un modo elegante, para fuerzas centrales resultados conocidos sobre la existencia y determinación de soluciones estacionarias, es decir, que aunque los tres cuerpos se mueven atraídos mutuamente, siempre presentan la misma configuración geométrica. Este artículo fue, 20 años después, la base de la tesis doctoral de Antonio Elipe, quien obtiene soluciones estacionarias para el movimiento de sólidos.

En 1965, es contratado durante seis meses por ESRO (Organización Europea del Espacio) el embrión de lo que después sería la Agencia Europea del Espacio (ESA) para trabajar en el Bureau des Longitudes de París en un programa de cálculo de órbitas de satélites artificiales con medidas Doppler. Allí se encuentra con que el programa de cálculo que había diseñado el personal del Bureau basado en el método de Brouwer, no convergía por contener una serie en cuyos denominadores figuraban potencias crecientes de la excentricidad del satélite y ésta era casi nula. El Dr. Cid se aplica inmediatamente a intentar solventar esta dificultad, y así, obtiene nuevos conjuntos de variables que eliminan esos pequeños divisores, con lo que en un tiempo récord, el programa que desarrolla es operativo. Debido a este resultado, es invitado para dar varias conferencias en Institut d'Astrophysique de París, en l'Observatoire de Meudon y presenta varios artículos en congresos internacionales en colaboración con Jean Kovalevsky.

Con las ideas desarrolladas en París, regresa de nuevo a Zaragoza y se hace cargo de la dirección de varias tesis doctorales sobre métodos analíticos de órbitas de satélites artificiales. Recordemos brevemente, que el problema de movimiento de un satélite artificial⁵ consiste en un problema de dos cuerpos perturbado, es decir, al problema de Kepler se le añaden unas fuerzas (debidas a la falta de esfericidad de la Tierra sobre todo, aunque también influyen el rozamiento de la atmósfera terrestre, la atracción de la Luna y el Sol, etc.). Así, con José Félix Lahulla (1969) obtiene una teoría de permite reducir el problema a lo que se ha llamado *intermediario radial*, un problema más simple que el original del satélite, pero más complicado que el de Kepler (de ahí el nombre de intermediario) y que representa de un modo bastante aproximado el movimiento del satélite. Éste es el primer caso en la literatura que se conoce de intermediario radial, y a partir de él han aparecido otros con posterioridad.

Con Manuel Calvo (1971) obtiene una teoría analítica de primer orden en variables de Hill, a diferencia de los métodos tradicionales como el de Brouwer que consideraba otras variables como las de Delaunay. La ventaja de las variables de Hill es que una de las coordenadas es la distancia y precisamente es la variable que aparece de modo natural en el potencial de la teoría del satélite artificial. Sin embargo, tenía el inconveniente de que al no ser una variable angular no era factible el eliminarla por los métodos de perturbaciones clásicos. La dificultad la soslayaron mediante el uso de un método diferente, el llamado de Krylov - Bogoliubov - Mitropolsky, surgido en otro contexto, pero que resultó ser muy efectivo. Un poco más tarde, Juan Antonio Caballero (1975) en su tesis extiende estos resultados a una teoría de segundo orden.

Consciente de la importancia que tenía el disponer de un conjunto apropiado de variables para que los problemas se simplifica-

⁵Véase las contribuciones en este volumen de los profesores Abad y Ferrer

sen poderosamente, se dedica con sus colaboradores a esta tarea, de la que surgieron varios artículos y las tesis doctorales de José Manuel Correas (1973), que sistematiza métodos para distintos de órbitas mediante variables universales y la de Manuel Palacios (1976), donde aparentemente se introducen complicaciones innecesarias, como es el utilizar más variables de las necesarias (variables superabundantes), pero que sin embargo permite obtener ecuaciones diferenciales más simples y mejor adaptadas para su integración mediante métodos numéricos. Esta misma técnica la utilizará años después en la tesis de Sansaturio, pero para un problema distinto.

El problema de optimización de trayectorias es abordado en la tesis doctoral de Vicente Camarena (1972). Además, en esta Memoria se estudia lo que llamaron el efecto trampolín lunar, que consiste en aprovechar parte de la dinámica de la órbita lunar para dar impulso a la trayectoria de un satélite y que éste alcance teóricamente el infinito del sistema Tierra–Luna. De este modo se producía un gran ahorro de energía y por lo tanto de combustible. Técnicas similares a las propuestas ahí han sido aplicadas en órbitas interplanetarias, principalmente.

En esos años, finales de los 60 y principio de los 70, aparecieron varios métodos de perturbaciones, entre ellos quizás el más importante, el de Deprit, que fue llamado por su autor *de series de Lie*. Pues bien, Cid y sus colaboradores desde un principio estuvieron involucrados en el desarrollo de esos métodos, probando la equivalencia de varios de ellos y aplicándolos al satélite artificial y otros problemas de Mecánica celeste, como el del problema restringido de tres cuerpos, que modela movimientos como el de los asteroides bajo la influencia del Sol y Júpiter, y que fue objeto de la tesis de Sebastián Ferrer (1979) y el del problema estelar de tres cuerpos en la tesis de José Ángel Docobo (1977), que considera estrellas triples, de masa similar, pero de modo que una de ellas está bastante alejada de las otras y perturba la órbita kepleriana de éstas.

Esta línea sería continuada más adelante por Alberto Abad (1984) con la introducción de sistemas jerarquizados para el problema de n estrellas, bajo la dirección del profesor Docobo y también en la tesis de Carlos Osácar (1989).

En los problemas anteriormente tratados, una de las hipótesis es que los cuerpos (excepto la Tierra en el caso del satélite artificial) se consideran masas puntuales. Sin embargo, la realidad es diferente, pues incluso un satélite artificial tiene una forma diferente a una esfera, conteniendo paneles, etc. Por ello, hay que considerarlos como sólidos, es decir, cuerpos de un determinado volumen, de modo que al moverse, su forma no cambia (suele decirse que la distancia entre dos cualesquiera de sus puntos siempre es la misma). Ya Euler probó que el movimiento general de un sólido consistía en el de traslación de su centro de masas y en el de rotación. Preocupado por este problema, Cid y su equipo comienzan a analizarlo, obteniendo varios resultados y elaborando varias tesis doctorales. La primera fue la de José Badal (1976), con estudio detallado del movimiento de un sólido en un campo de fuerzas central y donde se obtienen nuevas variables *ad hoc*. En 1979 lee su tesis José Manuel Ferrándiz, donde analiza el problema simultáneo de la rotación y traslación de dos cuerpos, y donde aplica el método de Deprit a las variables angulares y orbitales.

Otro sólido que ya hemos mencionado es la Tierra que, como sabemos, está en rotación y además es atraída por el Sol y la Luna, que originan las llamadas *Precesión y Nutación* terrestres, por las que el eje de rotación de la Tierra (la línea de los polos) describe una especie de cono en unos 26 000 años. Pues bien, este problema es abordado en la tesis de Ernesto Cid (1982) donde se aplican los métodos de perturbaciones de Deprit en conjuntos de variables especialmente adaptados para movimientos rotacionales. Este trabajo fue continuado posteriormente por Ferrándiz y su estudiante Getino, obteniendo teorías muy precisas de la Nutación, incluso para una Tierra elástica y que ha estado a punto de ser

elegida como modelo oficial de la IAU.

Tras estos estudios de la rotación del sólido, decide dar un paso adelante y propone a Antonio Elipe el extender uno de sus trabajos sobre el movimiento de 3 cuerpos, ya reseñado anteriormente, al caso de sólidos. No solamente consiguieron obtener soluciones de equilibrio para tres sólidos de masas cualesquiera sino que, además, se logra en esta tesis (1983) extender al caso de sólidos las soluciones estacionarias del problema restringido de tres cuerpos, y se da una integración analítica para el movimiento orbital – rotacional de un satélite situado cerca del punto Lagrangiano L_4 (forma siempre un triángulo equilátero con los otros dos cuerpos), con claras aplicaciones prácticas, como la de una plataforma espacial en ese punto de equilibrio⁶.

En la tesis de Manuel Palacios se habían considerado variables sobreabundantes para el problema orbital. Pues bien, sugiere buscar conjuntos similares para el problema de rotación, lo que se hace en la tesis de María Eugenia Sansaturio (1986), con los parámetros de Euler y su formulación en términos de cuaternios.

Otra extensión de los sólidos la constituye el giróstato, que consiste en un sólido rígido con unas partes móviles, pero de modo que la distribución de masas siempre permanece igual. Este modelo ya fue propuesto en 1922 por Volterra para describir el movimiento de rotación de la Tierra, que como es sabido, posee una parte interna, el núcleo, que puede moverse independientemente del manto y corteza sin que varíe la distribución de masas. Con Antonio Viguera en su tesis (1983) obtiene por primera vez la existencia de 10 integrales para n giróstatos, análogas a las del problema de n cuerpos, y obtiene integraciones analíticas para casos particulares de giróstatos. Posteriormente, el Profesor Cid ha continuado con la extensión a giróscopos.

⁶Véase el artículo del profesor Floría en este volumen

En la actualidad, a sus 83 años, el trabajo del Dr. Cid se centra en su labor como Editor de la Revista, Monografías y Discursos de la Academia de Ciencias de Zaragoza, sorprendiéndonos continuamente con su agudeza y capacidad de síntesis, como fue en su Contestación al Discurso de Ingreso del Dr. Elipe en dicha Academia. No en vano le avala todo su historial científico, someramente descrito en las líneas precedentes y sus publicaciones y tesis doctorales que se enumeran en las páginas siguientes.

Queremos finalizar estas líneas de presentación de la actividad científica del Profesor Cid Palacios con un párrafo extraído del libro homenaje⁷ que sus discípulos y colegas editaron con motivo de su jubilación: *“Ésta es, de una manera muy sucinta, la biografía de un gran Profesor de la Universidad de Zaragoza cuyo ejemplo nos ha servido de guía a muchos discípulos y colaboradores. En particular, D. Rafael nos ha mostrado que la Matemática no es solo un bello lenguaje, sino también un instrumento muy valioso para plantear y resolver problemas que aparecen en otras áreas de conocimiento”*.



Figura 4.—Rafael Cid, con traje académico, 1981.

⁷Libro Homenaje al Profesor Cid Palacios con motivo de su jubilación. Servicio de Publicaciones de la Univ. de Zaragoza, 1988.

Lista de publicaciones del Profesor Cid

1. R. Cid (1947): "Órbita de la estrella doble b 1074". *Revista de Geofísica del CSIC*. **21**, 70-76.
2. R. Cid (1950): "Contribución al estudio de estrellas dobles visuales". *Revista de Geofísica del CSIC*. **35**, 262-267.
3. R. Cid (1950): "Contribución al estudio de estrellas dobles visuales". *Revista de Geofísica del CSIC*. **36**, 350-402.
4. R. Cid (1952): "Método de mejora de órbitas de estrellas dobles visuales". *Urania*. **232**, 201-223.
5. R. Cid (1955): "Cálculo de un eclipse central". *Urania*. **241**, 1-10.
6. R. Cid (1956): "Cálculo de órbitas parabólicas de estrellas dobles visuales". *Urania*. **244**, 1-5.
7. R. Cid (1957): "Sobre el problema de los tres cuerpos". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **XII**, 17-36.
8. R. Cid (1958): "Cálculo de eclipses de Sol". *Urania*. **246**, 1-14.
9. R. Cid (1958): "On the necessary and sufficient observations for determination of elliptic orbits in double stars". *The Astronomical Journal* **63**, (9), 395-397.
10. R. Cid (1960): "Cálculo y mejora de órbitas parabólicas en pares visuales". *Urania*. **252**, 129-137.
11. R. Cid (1960): "Métodos de cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales y aplicación al par ADS 13169". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **XV**, 37-49.
12. R. Cid (1963): "Determinación de órbitas hiperbólicas en estrellas dobles visuales". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **XVIII**, 5-17.
13. R. Cid (1965): "Calcul d'orbites de satellites artificiels avec des mesures Doppler". *Rev. Technique ESRO*. 1-21.
14. R. Cid (1967): "Principe des calculs d'orbites de satellites artificiels d'apres des mesures Doppler". *Note Technique du Bureau des Longitudes*. 1-23.

15. R. Cid (1968): "Cálculo de órbitas de estrellas dobles por puntos opuestos". *Urania*. **267** – **268**, 31-38.
16. R.Cid, J.F. Lahulla y M. Calvo (1968): "Movimiento hiperbólico de un satélite artificial atraído por un esferoide, en función de las variables de Hill". *Urania*. **267** – **268**, 39-47.
17. R. Cid (1969): "Corrección de órbitas y coordenadas por medidas Doppler". *Publicaciones del Seminario Matemático de Zaragoza*, **10**, 79-94.
18. R. Cid y J.F. Lahulla (1969): "Perturbaciones de corto periodo en el movimiento de un satélite artificial, en función de las variables de Hill". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **XXIV**, 159-165.
19. R. Cid y J.F. Lahulla (1971): "Perturbaciones de segundo orden y corto periodo, para el movimiento de un satélite artificial, en las variables de Hill". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **XXVI**, 333-343.
20. R. Cid y J.F. Lahulla (1971): "Aplicación de las transformaciones de Lie a la eliminación de términos de corto periodo". *Urania*. **274**, 177-184.
21. R. Cid y M. Calvo (1973): "On the equivalence between Hori and Lacina perturbation theories". *Astronomy and Astrophysics*, **26**, 225-228.
22. R. Cid (1973): "Métodos analíticos de resolución del problema de calculo de órbitas de satélites artificiales". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **28**, 413-425.
23. R. Cid, M. Calvo y J. M. Correas (1975): "Invariance in von Zeipel Method". *Celestial Mechanics*, **12**, 131-138.
24. R. Cid, y M. Calvo (1975): "Sistemas canónicos en Mecánica Celeste". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. **30**, 43-51.
25. R. Cid y V. Camarena (1976): "Formulación sistemática de la teoría de perturbaciones en el movimiento orbital". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **31**, 17-23.

26. R. Cid y M. Palacios (1976): "Paréntesis de Lagrange y ecuaciones de perturbación de un movimiento kepleriano". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **31**, 25-34.
27. R. Cid y M. Calvo (1973): "Extensiones canónicas y su aplicación a problemas de Mecánica Celeste". *Rev. Academia de Ciencias*, **28**, 13-21.
28. R. Cid (1979): "Cálculo de órbitas de estrellas dobles visuales". Discurso Académico. *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*. 1-26.
29. R. Cid, S. Ferrer y A. Elipe (1982): "Regularization of the Equations of Motion in Central Force Field" en *Dynamical Trapping and Evolution in the Solar System*. Editores V. Markellos & Y. Kozai. D. Reidel Pub. p. 39-46.
30. R. Cid, S. Ferrer y A. Elipe (1983): "Regularization and linearization of the equations of motion in central force-fields". *Celestial Mechanics*, **31**, 73-80.
31. R. Cid y A. Elipe (1985): "On the motion of three Rigid Bodies. Central Configurations". *Celestial Mechanics*, **37**, 113-126.
32. R. Cid, S. Ferrer y J.A. Caballero (1985): "Asymptotic solutions of the restricted problem near the equilateral Lagrangian points". *Celestial Mechanics*, **35**, 189-200.
33. R. Cid y A. Viguera (1985): "About the Problem of motion of N Gyrostats. The first Integrals" *Celestial Mechanics*, **36**, 155-162.
34. R. Cid, S. Ferrer y M.L. Sein-Echaluce (1986): "On the radial intermediaries and the time transformation in satellite theory". *Celestial Mechanics*, **38**, 191-205 .
35. R. Cid y M.E. San Saturio (1987): "Movimiento de un sólido pesado en un conjunto superabundante de variables". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **42**, 91-103.
36. R. Cid y S. Ferrer (1988): " On the derivatives of Hansen's coefficients in Delaunay variables". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **43**, 109-116.

37. R. Cid, y M. E. Sansaturio (1988): "Motion of Rigid Bodies in a Set of Redundant Variables" *Celestial Mechanics*, **42**, 263–278.
38. R. Cid (1989) : "Corrección de órbitas de estrellas dobles visuales por medio de series de Fourier". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **44**, 71-88.
39. R. Cid y A. Viguera (1990): "The analitical theory of the Earth's rotation using a symmetrical gyrostat as a model". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **45**, 83-93.
40. R. Cid y C. Osácar (1990): "Corrección de órbitas de estrellas dobles visuales". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **45**, 95-110.
41. R. Cid (1991): "Avances de la Astronomía en el siglo XX". *Seminario Interdisciplinar de la Universidad de Zaragoza*. 99-106.
42. R. Cid y M.C. Fernández (1991): "Motion of a Gyroscope in a set of redundant variables". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **46**, 75-81.
43. R. Cid y C. Longás (1992): "Corrección de órbitas de pares visuales por medio de series de Fourier de la anomalía media". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **47**, 129-135.
44. R. Cid y C. Longás (1993): "Corrección de órbitas de pares visuales utilizando solamente diferencias (O-C) en ángulos de posición". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **48**, 117-134.
45. E. Viñuales, R. Cid and A. Elipe (1995): "Visual binary star orbits in universal variables". *Astrophysics and Space Science*, **229**, 117-127.
46. R. Cid y C. Longás (1996): "Corrección de órbitas de estrellas dobles visuales". *Rev. Academia de Ciencias de Zaragoza*, **51**, 85-92. 47.
47. E. Viñuales y R. Cid (1997): "Correction of visual binary stars orbits with a precise number of observations or normal points". In *Visual double stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks* (J. A. Docobo, A. Elipe and H. McAllister Eds.). pp. 395-399. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Tesis doctorales dirigidas por el Profesor Cid

1. Juan Antonio Zaera de Toledo (1962): "Sobre la determinación de órbitas de estrellas dobles, examen de varios métodos. Aplicación a los sistemas ADS 1833, 7704, 1959, 12469, 13169, 16826 y 6871". Universidad de Zaragoza. (Tesis dirigida en colaboración con D. Ramón M. Aller Ulloa).
2. Miguel Liso Puente (1962): "Métodos de cálculo y mejora de órbitas de binarias visuales". Universidad de Zaragoza.
3. José Félix Lahulla Forniés (1969): "Movimiento de satélites artificiales. Eliminación de pequeños divisores en una teoría de segundo orden". Universidad de Zaragoza.
4. Manuel Calvo Pinilla (1971): "Aplicaciones de los métodos de promedios al estudio del movimiento de satélites artificiales". Universidad de Zaragoza.
5. Vicente Camarena Badía (1972): "Optimización de trayectorias y el efecto de trampolín lunar". Universidad de Zaragoza.
6. José Manuel Correas Dobato (1973): "Sistematización del cálculo de órbitas". Universidad de Zaragoza.
7. Juan Antonio Caballero Lasierra (1975): "Movimiento de un satélite artificial bajo la acción gravitatoria terrestre. Teoría de segundo orden en las variables de Hill". Universidad de Zaragoza.
8. Manuel Palacios Latasa (1976): "Sistemas canónicos con un número superabundante de variables. Equivalencia de métodos de integración. Aplicaciones". Universidad de Zaragoza..
9. José Badal Nicolás (1976): "Perturbaciones del movimiento rotatorio de un sólido en órbita kepleriana. Aplicaciones al caso de un satélite artificial". Universidad de Zaragoza.
10. José Angel Docobo Durántez (1977): "Aplicación de la teoría de perturbaciones al estudio de sistemas estelares triples". Universidad de Zaragoza.
11. José Manuel Ferrándiz Leal (1979): "Movimiento de dos sólidos sometidos a atracción newtoniana. Aplicaciones". Universidad de Zaragoza.

12. Sebastián Ferrer Martínez (1979): “Sobre la integración del problema restringido de tres cuerpos y su aplicación a asteroides Troyanos”. Universidad de Zaragoza.
13. Ernesto Cid Palacios (1982): “Sobre el movimiento de sólidos en torno a sus centros de masas con aplicaciones al estudio de la precesión y nutación terrestres”. Universidad de Zaragoza.
14. Antonio Vigueras Campuzano (1983): “Movimiento rotatorio de giróstatos y aplicaciones”. Universidad de Zaragoza.
15. Antonio Elipe Sánchez (1983): “Soluciones de equilibrio en el problema general y restringido de tres sólidos. Aplicación a movimientos en torno a los puntos lagrangianos” Universidad de Zaragoza.(Tesis dirigida en colaboración con Sebastián Ferrer Martínez).
16. María Eugenia San Saturio Lapeña (1986): “Movimiento de sólidos en un conjunto superabundante de variables. Aplicación al sólido pesado”. Universidad de Zaragoza.
17. Carlos Osacar Soriano (1989): “Estudio del movimiento de sistemas estelares”. Universidad de Zaragoza.(Tesis dirigida en colaboración con Sebastián Ferrer Martínez).
18. Concepción Longás Monguilod (1993): “Cálculo y corrección de órbitas de estrellas dobles visuales”. Universidad de Zaragoza.
19. Ederlinda Viñuales Gavín (1993): “Generalización de métodos de cálculo y corrección de órbitas de estrellas dobles visuales”. Universidad de Barcelona. (Tesis dirigida en colaboración con Antonio Elipe Sánchez).
20. Yoël Lana-Renault (1998): “Modelo de constitución interna de la Tierra”. Departamento de Física Teórica. Universidad de Zaragoza. (Tesis dirigida en colaboración con José I. Badal Nicolás).

La máquina del Cielo

Reflexiones astronómicas en torno a la investigación del
Profesor CID PALACIOS

