

LA APORTACIÓN DE LLUÍS BEL AL DESARROLLO DE LA FÍSICA RELATIVISTA EN ESPAÑA

PABLO SOLER FERRÁN
Investigador independiente

Resumen

Se muestra la aportación del físico Lluís Bel al desarrollo de la física relativista en España desde los años 1970, en concreto con la formación de uno de los grupos de investigación sobre relatividad, el de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Bel venía desarrollando su carrera investigadora en Francia, principalmente en radiación gravitacional, cuando en 1971 fue invitado a la UAM, hecho que se enmarca en el intento de renovación de la ciencia española en esos años. Diferentes problemas motivaron que solo permaneciera en España dos años, pero en ese tiempo se logró consolidar de forma estable un grupo de investigación, que trabajó principalmente en Mecánica Relativista Predictiva (MRP) y Teoría Cinética de la Cosmología, con la realización de tesis doctorales y la progresiva implantación de los físicos españoles en la escena científica internacional. Se repasan sintéticamente estas disciplinas, así como la trayectoria de sus principales discípulos y el inicio de los *Encuentros Relativistas Españoles*, que evolucionarían hacia congresos internacionales. Se incluye también un breve análisis de la reciente controversia sobre el impacto de la MRP, tanto en general sobre la física teórica española como en concreto sobre la formulación de una base teórica para el análisis dinámico de los púlsares binarios. Este trabajo se circunscribe a los años 1970, por considerar que al final de aquella década la investigación sobre relatividad en España ya estaba asentada según las pautas de la ciencia internacional.

Abstract

We discuss the contribution of the physicist Lluís Bel to relativistic physics in Spain in the 1970s, focusing on his role in the formation of a research group in relativity in the *Universidad Autónoma de Madrid* (UAM). When invited to join the UAM, Bel was conducting research on gravitational radiation in France. His move to the UAM in the early 1970s was part of a broad attempt to strengthen Spanish science. Even though Bel left Spain only two years after his arrival, in that short period of time he managed to establish a solid research group on Predictive Relativistic Mechanics (PRM) and the Kinetic Theory of Cosmology. The group led to the completion of several doctoral theses and the progressive introduction of Spanish

physicists in the international scientific scene. We briefly review these developments, as well as the career of key members of the group and the foundation of the *Encuentros Relativistas Españoles*, which eventually became international conferences. We also summarize the recent discussion over the importance of PRM, both in Spanish theoretical physics and in the development of a theoretical basis for the dynamical analysis of binary pulsars. The paper's scope is restricted to the 1970s, for we consider that research on relativity in Spain was already solidly established by the end of the decade.

Palabras Clave: Física, Teoría de la Relatividad, España, Siglo XX, Lluís Bel.

Keywords: Physics, Theory of Relativity, Spain, 20th Century, Lluís Bel.

Recibido el 24 de enero de 2015 – Aceptado el 27 junio de 2015

INTRODUCCIÓN¹

En este trabajo se argumenta la importancia del físico español Lluís Bel, tanto en la comunidad relativista internacional como en la física española, y en concreto su trascendental influencia en el desarrollo de la física relativista en España en los años setenta del siglo pasado.

En efecto, en cuanto a la contribución de Lluís Bel a la Física, son reconocidas sus aportaciones sobre radiación gravitacional en el marco de la relatividad general, que incluye el establecimiento de un nuevo tensor, conocido como tensor de Bel-Robinson y utilizado frecuentemente por los especialistas en la materia. También son muy valoradas sus contribuciones al estudio teórico de los púlsares binarios. Evidentemente la carrera científica de Bel, mayoritariamente dedicada a la relatividad general, hay que enmarcarla en el contexto internacional del renacimiento de esta disciplina desde mediados del Siglo XX [WILL, 1989, pp. 15-25; KRAGH, 2007, pp. 351-355].

Respecto a su influencia en España, de la misma forma que a Blas Cabrera se le denomina el “padre” de la física española, a Bel se le reconoce como el “padre” de los físicos relativistas españoles [MARTÍN y MOLINA, 1999]. Bel fue determinante en la creación de uno de los principales grupo de investigadores españoles sobre relatividad desde 1970, el de la Universidad Autónoma de Madrid, dirigiendo investigaciones en línea con las que ya estaba realizando en Francia. En esos años, los otros grupos fueron los de las Universidades de Barcelona y Autónoma de Barcelona, liderados respectivamente por Lluís Mas y Ramón Lapiedra, con los que Bel colaboró activamente².

Además, Bel fue uno de los promotores, principalmente junto con Lluís Mas, de los denominados *Encuentros Relativistas Españoles* que dieron comienzo en 1977 y fueron adquiriendo con el tiempo prestigio en la comunidad científica consolidándose como congresos científicos internacionales.

Aunque un estudio completo del desarrollo de la física relativista en España requeriría analizar la labor de los tres grupos de investigación antes citados y aumentar el margen temporal en estudio, en este caso nos limitamos por una parte solo al grupo de la UAM (ya que fue el que lideró Bel), y por otra, desde el punto de vista cronológico, nos centramos hasta 1980, por considerar que ya en esta fecha se produce el asentamiento definitivo de la comunidad relativista española en la escena internacional.

1. LLUÍS BEL: EL RETORNO TEMPORAL A ESPAÑA DE UN FÍSICO FORMADO EN FRANCIA³

Lluís Bel, actualmente jubilado, nació en Barcelona en 1933, se licenció en Físicas en 1956 por la Universidad de Barcelona y realizó estudios de doctorado en Francia, presentando su tesis doctoral en 1960 bajo la dirección de A. Lichnerowicz⁴ y consiguiendo así el grado de Doctor en Matemáticas por la Universidad de París. Desde 1958 trabajó, principalmente, sobre radiación gravitacional, consiguiendo posteriormente un reconocido prestigio en la escena científica internacional, fundamentalmente por el establecimiento de un nuevo tensor usado en Relatividad General. Bel desarrolló prácticamente toda su carrera profesional como investigador en el CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*). Realizó algunas estancias temporales en Estados Unidos, en los cursos 1961-62 (Universidad de Carolina del Norte), 1962-63 (Universidad de Austin, Texas) y en 1968-69 (en la Universidad de Brown, Providence). Al poco de regresar Bel a Francia desde su estancia en Austin, fue invitado a participar en el primer congreso sobre Astrofísica Relativista, celebrado en Texas en 1963, del que se ha señalado su importancia histórica [SCHUCKING, 1989; SÁNCHEZ RON, 2014, pp. 162-164]. Bel asistió pero sin presentar comunicación⁵.

Posteriormente fue invitado a incorporarse en la Universidad Autónoma de Madrid, donde permaneció como profesor de Física Teórica desde 1971 hasta 1973 (cuyos pormenores se tratan en el siguiente apartado). Además impartió un curso en 1977 en la Universidad Autónoma de Barcelona sobre Mecánica Relativista Predictiva.

Aunque la idea de Bel era quedarse definitivamente en España⁶, una serie de desacuerdos con las autoridades científicas de la época le hicieron volver a París para continuar ejerciendo el cargo que ya ostentaba como *Maitre de recherches* del CNRS. Más tarde, ya en los años 80, pasó a dirigir el Laboratorio de Gravitación y Cosmología Relativista del *Institut Henri Poincaré* de París. Bel ha trabajado sobre Teoría de la Relatividad, Gravitación y Cosmología, Dinámica de Sistemas Invariantes y Mecánica Cuántica Relativista. Ha sido condecorado con el premio del *College de France* en 1971, con el “Narcís Monturiol” al mérito científico de la *Generalitat de Catalunya* en 1982⁷ y con el premio de la *Fundació Catalana per a la Recerca* en 1997. Después de jubilarse en Francia, desde la Universidad del País Vasco, con cuyos científicos relativistas se mantenía en contacto, se le ofreció una plaza de profe-

sor invitado, por lo que fijó su residencia en Bilbao, plaza que ocupó durante tres años hasta su jubilación definitiva⁸.

Pero, a pesar de los méritos científicos de Bel anteriormente expuestos, realmente no parece que sea muy conocido entre los físicos en general, con la salvedad de los especialistas en relatividad, ni entre los historiadores de la ciencia⁹. Las causas probablemente se deban a dos motivos: primero, el que la relatividad no ha tenido tanto interés entre los físicos españoles como la Teoría Cuántica de Campos o la Física de Altas Energías¹⁰; segundo, el hecho de que sus contribuciones más reconocidas, principalmente sobre radiación gravitacional, las hiciera en los años 1950 y 1960 y posteriormente dedicara casi todos sus esfuerzos a una disciplina que con el tiempo quedaría marginada, la Mecánica Relativista Predictiva, lo que incluso ha motivado una controversia sobre los excesivos recursos dedicados a ella, aspecto que se analiza más adelante.

Un aspecto en el que conviene reflexionar es sobre el carácter nacional de Bel como científico. Actualmente no tiene mucho sentido hablar de física española en sentido estricto, como ente autónomo, ya que cada vez la ciencia va teniendo más carácter internacional. Pero esto no era así a mediados del siglo XX, sobre todo en España por el carácter autárquico de su régimen, carácter que se extendió a lo que se ha denominado *física autárquica* [HERRAN y ROQUÉ, 2012, p. 94] y que se iría abandonando paulatinamente. De esta forma hasta los años 70 u 80 sí considero que puede tener sentido hablar de física española porque caracteriza el tipo de política científica que se hacía en nuestro país. Pero realmente Bel no era un físico español, en el sentido de ser producto de la ciencia española, sino a todos los efectos francés, ya que el doctorado y toda su carrera investigadora los hizo en Francia, gracias a un programa de becas del gobierno francés para jóvenes licenciados iniciado en los años 1950 [CARPIO, 2010]. Además, en el caso de Bel, su carrera científica lo fue en ciencia básica, sin aplicación directa a resultados prácticos, lo que en esa época era poco menos que imposible en nuestro país, por lo menos hasta finales de los 60 cuando se empieza a desarrollar la física teórica, principalmente con la creación del *Grupo Interuniversitario de Física Teórica* (GIFT) [GÁMEZ, 2004].

Ahora bien, es indudable que Bel mantuvo y quiso expresamente mantener contactos con su país de origen. Por ejemplo asistió a un encuentro sobre física teórica organizado en Santander en 1965, sobre el que volveremos más adelante. El otro hecho que demuestra su interés por hacer ciencia en España es su estancia ya citada en la UAM, que fue determinante para la creación del grupo de físicos relativistas españoles, de tal forma que cabe hablar de física relativista en España, gracias fundamentalmente, entre otros, a Lluís Bel. A pesar de la impronta que dejó Bel en nuestro país es evidente la importante pérdida que supuso para la física española no lograr que se quedara para continuar su carrera científica.

El regreso de Bel a España no fue un caso aislado, sino que hay que enmarcarlo en el intento de regeneración de la ciencia española a finales de la dictadura, que incluyó la vuelta de algunos de los más prestigiosos científicos españoles en el extranjero, como el bioquímico Severo Ochoa (1905-1993), el físico Nicolás Cabrera (1913-1989, profesor universitario de física en Estados Unidos e hijo de Blas Cabrera) y, en el caso que nos ocupa, especialistas en relatividad como, además de Bel, Lluís Mas [SANZ, 1997, pp. 143-148 y 156-162; SÁNCHEZ RON, 2003b].

La invitación a la UAM vino de la mano de Nicolás Cabrera, quien a su vez en 1969 recibió la propuesta de regresar a España para dirigir el Departamento de Física Teórica de aquella universidad¹¹. Dicha propuesta fue la culminación de unas negociaciones previas, en las cuales Cabrera ya mostró la necesidad de iniciar “un Instituto de Física en Madrid que forzosamente requiere el juntar desde el primer momento un grupo mínimo de físicos de altura. Creo que conozco ese grupo compuesto de jóvenes localizados en España y fuera de España”¹².

Bel tenía esperanzas en la figura de Cabrera como organizador de la Física Teórica en la UAM: “Era estimulante. En Cabrera era un home que inspirava confiança i simpatia. I provaven una cosa nova. Es parlava d’Universitats com no havien existit abans” [BEL, 2002]. Además, estaba muy ilusionado con el proyecto de la UAM porque consideraba que el programa de las Universidades Autónomas era muy novedoso en España y con mucho futuro: “O sigui que era una experiència que no estava permès no col·laborar. Allà m’ho vaig passar molt bé” [BEL, 2002]¹³. Vemos que las palabras de Bel son similares a las de Nicolás Cabrera, que afirmaba en 1970 respecto a los motivos para volver a España:

Porque en estos momentos mi mayor ilusión es contribuir al impulso de la nueva Universidad española. Es una gran oportunidad —incluso sentimental para mi— de continuar la obra de mis maestros. He venido dispuesto a no desperdiciar la coyuntura favorable a mis experiencias adquiridas por estos mundos¹⁴.

Una vez aceptada por Cabrera la dirección del departamento, las negociaciones se concretaron en las personas que debían incorporarse desde el exterior. De esta forma Cabrera propuso los nombres, entre otros, de Eduardo de Rafael (otro de los físicos españoles que marchó a Francia en los años 50 gracias a la oferta de becas del gobierno francés) y a Lluís Bel¹⁵. Cabrera tenía clara la necesidad de establecer un programa específico sobre relatividad, dirigido por Bel como profesor contratado con un presupuesto asociado que debía incluir la figura de un colaborador y personal no académico. Se contemplaría un periodo mínimo de tres años para la incorporación definitiva de Bel como catedrático. Ahora bien, Cabrera ya avisaba que “esos candidatos necesitan seguridad”¹⁶. Aquí vemos dos de las claves de los problemas posteriores de Bel que le forzaron a volver a Francia. Efectivamente Bel contó con un profesor colaborador, su principal discípulo Jesús (Chus) Martín, que sería posteriormente expulsado por cuestiones políticas, lo que influyó de forma determinante a Bel en su

decisión¹⁷. El otro aspecto es el de la “seguridad” que pedía Cabrera y Bel nunca obtuvo¹⁸.

A pesar de que Bel lo recuerda como una buena época, los problemas empezaron el segundo año de su estancia en España por discrepancias de diverso tipo con el entonces vicerrector de la UAM, Julio Rodríguez Martínez (1928-1979), que luego sería el rector y posteriormente ministro de Educación, sustituyendo en 1973 a Villar Palasí (1922-2012). Julio Rodríguez, situado en la extrema derecha (más tarde estuvo vinculado al partido Fuerza Nueva), fue el responsable directo de la expulsión de la UAM de varios profesores. Estos problemas respondían al ambiente de conflictividad política en las universidades españolas e incluso se reflejaron en la prensa de la época¹⁹. Según Bel, a Julio Rodríguez no le agradaba nada que viniera gente del extranjero a organizar las enseñanzas universitarias. También Bel tanteó la posibilidad de ir a la Universidad de Barcelona, lo que le hacía mucha ilusión, pero no le hicieron ninguna oferta, con lo que decidió volverse definitivamente a Francia [BEL, 2002].

Otro aspecto concreto de discrepancia fue el acuerdo económico, ya que no equipararon el sueldo de Bel con el de los catedráticos por oposición (recordemos que los profesores españoles residentes en el extranjero vinieron en calidad de invitados) lo que, según Martín, le habían prometido.

Las palabras de Martín son significativas sobre la desazón que tuvo que sentir Bel al decidirse volver a Francia:

Bel venía con una ilusión [...] pero al ver como se estaba desmoronando el proyecto inicial [...], fue paulatino. Entonces se empieza a calentar el asunto en el sentido de que esta gente qué hace aquí, de que no podían estar aquí [se refiere a la opinión de Julio Rodríguez en contra de los catedráticos invitados y sin oposición en España] Realmente a Bel no le expulsaron, pero se le trató muy mal, se le humilló en sus convicciones, en su sueldo, en sus creencias científicas. No le pagan lo que le habían prometido. [...] Nicolás Cabrera tenía un cabreo [...] pero Cabrera era un icono, no se metían con él, era mayor y estaba dispuesto a contemporizar²⁰. [...] Bel era director de *Recherche* en Francia y ahí le reconocían. Cuando vino aquí hizo un esfuerzo [...], tenía tres hijos, fue de los que quemó naves y en Francia pidió la excedencia²¹.

Sin duda el caso particular de Bel en la UAM ejemplifica perfectamente tanto la situación original de las universidades autónomas en cuanto a intento de renovación de la ciencia española, que incluía aspectos democratizadores, como la posterior conflictividad política en las mismas que marcaron su futuro inmediato, precisamente por la involución del régimen en sus últimos años y su vuelta a políticas totalitarias que marcaron los años 40 y 50 [AGUILAR, 2007].

2. LA RELATIVIDAD EN ESPAÑA DURANTE EL FRANQUISMO

Es conocido que en la dictadura franquista se dio clara prioridad a la física aplicada, especialmente a la nuclear, frente a la teórica [SÁNCHEZ RON, 2003a]. De hecho los principales grupos de trabajo en física teórica en las décadas de los 50 y 60 se organi-

zaron bajo el auspicio de la JEN (Junta de Energía Nuclear) con el claro propósito de que fueran aplicables a desarrollos asociados a la física nuclear. Anteriormente se puede afirmar que en la práctica no existía la física teórica en España [VALERA y LÓPEZ, 2001, pp. 305-307].

Aunque la Teoría de la Relatividad estaba asumida por la comunidad científica española, con la excepción de Julio Palacios (1891-1970) que fue un caso aislado, ciertamente no hubo una labor investigadora de conjunto sobre la misma, sino contribuciones de tipo individual, algunas interesantes pero que no respondían a un interés de política científica, ya que, como ya hemos indicado, dicho interés se centró en la física nuclear [SOLER, 2012, p. 135].

Dos hechos marcan claramente el futuro de la física relativista en España: la estancia en Francia de varios físicos catalanes desde la década de los cincuenta y la creación en 1968 del GIFT, ambos ya citados anteriormente.

Desde los años 1950 el gobierno francés desarrolló un programa de becas para ampliación de estudios en Francia de jóvenes licenciados de otros países, lo que influyó de forma determinante en estudiantes de física de la Universidad de Barcelona. Uno de los motivos de este impacto en Barcelona era la política centralista del régimen que concedía la mayoría de becas para investigación en Madrid. En concreto, más de treinta licenciados en física por la Universidad de Barcelona emigraron a Francia para realizar estudios de doctorado. Evidentemente, en esta influencia entre los físicos catalanes también fue un factor determinante las cuestiones políticas, ya que algunos de ellos frecuentaban los ambientes políticos universitarios españoles opuestos a la dictadura. La mayoría trabajarían en física nuclear y de altas energías, pero dos de ellos desarrollaron su labor investigadora en relatividad, Lluís Bel y Lluís Mas, dirigidos en París por A. Lichnerowicz. En este programa de becas fue determinante la actuación del físico francés Claude Colin (1926-1965), agregado científico del Instituto Francés en España y que impartió seminarios y cursos de doctorado en Barcelona. Uno de estos cursos fue “Introducción matemática a la física teórica”, del que Bel fue alumno. Bel valora muy positivamente el recuerdo de Colin y por tanto es evidente la influencia del físico francés en su determinación de marcharse a Francia. De hecho Bel fue el primer becario seleccionado por Colin [CARPIO, 2010, pp. 20-29, 69].

Bajo la dirección de Lichnerowicz también trabajaron sobre relatividad otros físicos españoles que fueron a Francia más tarde, a finales de los años 1960. Son los casos de Chus Martín y Bartolomé Coll. El primero volvería a España para trabajar bajo la dirección de Bel y Coll desarrollaría su carrera profesional en Francia. Es obvio que la influencia de Lichnerowicz en la dirección de trabajos se vio favorecida por el ambiente internacional en cuanto a las posibilidades de investigación sobre relatividad general, lo que supuso un renacimiento de esta disciplina. Así, Kragh [2007, p. 352] y Will [1989, p. 21] señalan grupos influyentes en Estados Unidos,

Inglaterra y la URSS, pero queremos reivindicar aquí también la importancia del grupo francés encabezado por Lichnerowicz, y continuado por Bel y posteriormente por Martín y los físicos franceses Thibault Damour y Nathalie Dereulle, estos últimos en concreto en los años 1980 sobre el estudio de los púlsares binarios, aspecto sobre el que volveremos más adelante.

Desde mediados de los años 60, se dio un importante impulso al desarrollo la física teórica en España, organizándose en 1965 un primer encuentro sobre esta disciplina, ya mencionado anteriormente. Los protagonistas fueron los principales teóricos en la materia en nuestro país, lográndose además la participación de Lluís Bel, quien presentó su teoría de la radiación gravitacional [BEL, 1965]. Además, esta reunión fue trascendental porque supuso el germen del GIFT, que tendría una importancia capital en el desarrollo de la física teórica en España [SOLER, 2010, pp. 394-403].

En 1968 se crea definitivamente el GIFT, con el objetivo principal de coordinar los estudios y programas de doctorado de física teórica, así como dirigir la investigación en física nuclear y de altas energías. En menor medida, también promocionó la investigación en relatividad, lo que se hizo efectivo a principios de los años setenta. El GIFT creó una serie de grupos dedicados a diferentes ramas de la Física Teórica, encargándose Lluís Bel de la dirección del de relatividad. Desde 1968 el GIFT comenzó a realizar congresos internacionales sobre física teórica, aunque no hubo ninguno dedicado específicamente a relatividad, ya que la mayoría se centraron en física de partículas, nuclear y sobre teoría cuántica de campos. Los específicos sobre relatividad llegarían más tarde, a partir de 1977, con la creación de los *Encuentros Relativistas Españoles*, pero no fueron organizados directamente por el GIFT sino por Bel, Mas y otros físicos relativistas. Como hemos visto, Bel volvió a España en 1971 y, aunque sólo estuvo dos años, su influencia fue determinante para crear un grupo de físicos relativistas en la UAM. Lluís Mas, que ya había presentado su segunda tesis doctoral sobre relatividad en la UAB en 1970 (la primera fue en Francia), fue así el principal inductor de otro grupo equivalente en Barcelona, aunque posteriormente pasaría a la Universidad de las Islas Baleares. La influencia del GIFT en el auge de la física relativista en nuestro país se concretó en la concesión de becas a algunos investigadores en la materia, como Chus Martín y Xavier Fustero.

Evidentemente, este auge de la investigación sobre relatividad en España hay que contemplarlo en el ámbito general de la renovación paulatina de la ciencia española, ya comentado anteriormente, y favorecido por la vuelta a España de físicos como Nicolás Cabrea, Lluís Bel o Lluís Mas.

3. LA CONSOLIDACIÓN DE LA RELATIVIDAD COMO DISCIPLINA INVESTIGADORA EN ESPAÑA

Como se ha indicado anteriormente, los primeros años setenta suponen el comienzo de la labor investigadora organizada sobre relatividad en España, con la crea-

ción de grupos específicos de investigadores bajo una dirección científica concreta. Los principales se crearon en torno a la UAM, la UB y la UAB²². Tres hechos señalan claramente este proceso: la realización de tesis doctorales sobre relatividad, la publicación significativa de trabajos en revistas especializadas extranjeras y el comienzo de los *Encuentros Relativistas Españoles*.

Del grupo de la UAM inicialmente formaron parte Lluís Bel, Chus Martín, Enrique Álvarez, José Gracia Bondía, Angel Salas, José Manuel Sánchez Ron y José Luis Sanz. A partir de la marcha de Bel en 1973 el grupo original se fue diluyendo paulatinamente, pero posteriormente se amplió en torno a Chus Martín y sus discípulos: Jose María Senovilla y Jesús Ibáñez²³. En Barcelona se formaron dos grupos: uno en la UAB liderado por Lluís Mas, con Xavier Fustero, Enric Verdaguer y Carles Bona; el otro en la UB encabezado por Ramón Lapiedra, con Vicente Iranzo, Alfred Molina y Josep Llosa Carrasco.

Aunque los tres grupos tuvieron similar relevancia en cuanto al desarrollo de la física relativista en España, debido al alcance de este trabajo nos limitamos aquí al análisis del grupo de la UAM, encabezado por Bel. Dos temas protagonizan el esfuerzo de los físicos de la UAM: la Mecánica Relativista Predictiva (MRP) y la Teoría Cinética de la Cosmología (TCC). Indirectamente la TCC derivaría en el estudio teórico de los cuásares. También hubo trabajos sobre otros temas genéricos de relatividad, como el estudio de métricas concretas y de soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein.

Lluís Bel dirigió tres tesis doctorales en la UAM. A Chus Martín sobre soluciones de las ecuaciones de campos basadas en una métrica concreta [MARTÍN, 1973], a José Gracia Bondía sobre cuásares y la teoría cinética de la cosmología [GRACIA-BONDÍA, 1975] y a Enrique Álvarez sobre temas de termodinámica relativista [ÁLVA-REZ, 1975].

A su vez, hay tres discípulos directos de Chus Martín que han trabajado sobre relatividad y en mayor o menor medida han sido influenciados por Bel, e incluso han colaborado con él: son José Luis Sanz, José María Senovilla y Jesús Ibáñez. Sanz se doctoró en 1976 por la UAM, Ibáñez también por la UAM en 1974 y Senovilla en 1986 por la Universidad de Salamanca.

Aunque se puede considerar que la principal contribución de Bel fue la radiación gravitacional, en este campo no creó un grupo de trabajo específico en España. Pero sí hubo posteriormente investigaciones en la que se conjugaba la radiación gravitacional con la Mecánica Relativista Predictiva para aplicarlo al estudio cuantitativo de la evolución de los púlsares.

Sobre Mecánica Relativista Predictiva hubo colaboraciones entre Bel y el grupo de Barcelona, con Xavier Fustero y Ramón Lapiedra. En Madrid sus principales colaboradores en este tema fueron Martín, Salas y Sánchez Ron.

En cuanto a aspectos sobre soluciones de las ecuaciones de campo, no parece que se consolidaran en el futuro en el grupo de la UAM, aunque hemos visto que Bel dirigió a Martín su tesis doctoral basada en la métrica de Kerr.

Otra línea de trabajo muy productiva fue la TCC, en la que destacaron, con la colaboración de Bel, Enrique Álvarez y Gracia Bondía. Se trataron aspectos de termodinámica relativista y estudios teóricos de los cuásares.

Todos estos aspectos, Radiación Gravitacional, Mecánica Relativista Predictiva, Soluciones de ecuaciones de Campo y Teoría Cinética de la Cosmología se tratan más adelante en sus respectivos epígrafes.

El comienzo de la celebración de encuentros específicos sobre relatividad, desde mediados de los años 70, fue fundamental en la consolidación de la relatividad como disciplina investigadora en España. Estas reuniones, que con el tiempo adquirirán el papel de congresos, se consolidaron con el nombre de *Encuentros Relativistas Españoles* (ERE)²⁴. También desde 1975 se organizaron las *Asambleas Nacionales de Astronomía y Astrofísica*, en las que jugó un papel importante la Astrofísica Relativista [SOLER, 2010, pp. 575-579], aunque el grupo asociado a Lluís Bel no tuvo protagonismo en las mismas.

El primer *Encuentro* tuvo lugar en 1977 y aunque no tuvo denominación oficial de ERE, los especialistas lo consideran como el primero de ellos [SENOVILLA, 2014]. Desde entonces se organizaron reuniones similares todos los años, pero no se hicieron actas oficiales hasta la séptima, la de 1982, que ya puede considerarse con la categoría de congreso científico.

El origen de estas reuniones científicas se sitúa en la invitación de Lluís Mas a Lluís Bel en 1976 para impartir un curso sobre Mecánica Relativista Predictiva en la Universidad Autónoma de Barcelona. A raíz de este curso, al que asistieron muchos físicos españoles interesados en relatividad, se discutió la posibilidad de organizar encuentros anuales entre los investigadores españoles sobre relatividad, lo que daría origen al primero de los *Encuentros Relativistas Españoles* celebrado en 1977 en la Universidad Autónoma de Madrid. Este primer evento se organizó con la clara intención de consolidarlo con el tiempo para que sirviera de punto de encuentro de los físicos relativistas en España e intentar su proyección internacional, lo que se lograría más tarde. Pero estos primeros “encuentros” no tuvieron un carácter de congresos como tales, sino más bien coloquios informales en los que cada participante exponía las líneas de trabajo en las que estaban investigando²⁵. De hecho, hasta 1982 no hubo actas de dichos encuentros, en concreto en el celebrado en Bilbao, donde de dichas actas sí se puede concluir que es un congreso consolidado, con bastantes contribuciones interesantes, que reflejan la buena marcha de la labor investigadora sobre relatividad en España.

El nombre de ERE surgió de que los promotores querían hacer algo parecido a las *Journes Relativistes* franceses, pero no querían darle el nombre de jornadas preci-

samente porque en Francia ya eran reconocidas con carácter oficial de congresos y ellos pensaban en encuentros más informales inicialmente, así que decidieron darle el nombre de encuentros relativistas españoles²⁶.

A partir del ERE de 1983 empieza a haber colaboraciones de investigadores internacionales y poco a poco estos *encuentros* se consolidaron como congresos no ya solo de la comunidad relativista española, sino de los físicos relativistas en general. Actualmente tienen carácter de congresos internacionales sobre relatividad y gravitación. En 1998 se organizó un ERE específico en homenaje a Lluís Bel, con intervención de él mismo y de varios colegas que dedicaron algunas comunicaciones a sus aportaciones, en especial al tensor que lleva su nombre [MARTÍN, 1999].

En el ERE de 1982 todavía no hay contribuciones de científicos internacionales y la mayoría de los participantes fueron nuestros protagonistas de la fase inicial de los 70, incluido Lluís Bel, aunque ya se empiezan a incorporar jóvenes licenciados que trabajan en relatividad. [ENCUENTROS, 1983]. En el siguiente, celebrado en Palma de Mallorca, se da ya presencia de ponentes de otros países y aumentan significativamente las comunicaciones de nuevos científicos españoles dedicados a la relatividad [ENCUENTROS, 1984]. En estos primeros ERE's con actas se trataron temas de mecánica relativista predictiva, ondas gravitacionales, efectos relativistas en sistemas binarios, lentes gravitacionales, el problema de la rigidez en relatividad especial, soluciones de las ecuaciones de Einstein, física de plasmas relativista, teorías gauge de la gravedad, problemas interactivos en relatividad, métricas espacio-temporales como la de Kerr, modelos cosmológicos basados en la radiación de fondo y otros problemas concretos.

Por último, hay que hacer una breve aclaración sobre la responsabilidad de Bel en el inicio de los EREs. Según Senovilla (2014), Bel es el fundador junto con algunos de sus colaboradores y estudiantes; según Martín y Molina (1999), Bel sería el fundador, quizá inconscientemente. En definitiva, parece que hay acuerdo en que se le considera el principal promotor de los ERE, pero el propio Bel no opina así, cediendo los méritos a Lluís Mas y a la inercia general del grupo que se formó en torno a su curso en la Universidad de Barcelona de 1977:

O sigui que la gent que diu que és idea meva no és idea meva. Em van demanar de fer un curs i la meva participació va consistir en això. Participar-hi després ha sigut rutina. Que és la fórmula que es segueix practicant. Unes conferències principals i després unes comunicacions. Es va transformar ràpidament en un fòrum perquè la gent, sobre tot d'aquí, tingué oportunitat [BEL, 2002].

4. APORTACIONES CIENTÍFICAS DE BEL Y EL GRUPO DE LA UAM

En este apartado se repasan los cuatro campos en los que hubo aportaciones significativas, primero de Bel en Francia y posteriormente del grupo dirigido por él.

La teoría de la radiación gravitacional

La radiación gravitacional es el proceso de generación de ondas gravitacionales por un sistema con pérdida de energía gravitatoria, de forma similar a la radiación electromagnética. A su vez, las ondas gravitacionales son la propagación de las oscilaciones en la curvatura del espacio-tiempo, y son una consecuencia teórica de la relatividad general. Aunque los estudios teóricos sobre ondas gravitacionales se iniciaron hacia 1918, éstos estaban prácticamente abandonados a mediados del Siglo XX. Pero en los años 1960 se planteó la posibilidad de la detección experimental de este fenómeno, posibilidad que no se afianzó hasta 1974, gracias al descubrimiento de los púlsares binarios [WILL, 1989, p. 157]. Por esto mismo resulta tan interesante la aportación de Lluís Bel, quien desde 1958 venía trabajando sobre el tema [BEL, 1958a, 1958b, 1958c, 1959, 1961].

Bel consideraba la radiación gravitacional uno de los aspectos más originales de la relatividad y de trascendental importancia para la cuantificación del campo gravitatorio. En 1958, basándose en trabajos previos de Lichnerowicz, logró presentar una teoría que relacionaba la definición de la densidad de energía gravitacional con los estados de radiación gravitacional. Para ello hizo uso de la conocida clasificación de los tensores por parte del matemático ruso Aleksei Z. Petrov (1910-1972), adaptándola para su uso en relatividad general. Algunos físicos, como Lluís Mas, denomina a esta adaptación la clasificación de Bel-Petrov, que también es conocida como criterio de Bel, adaptación que se usa para simplificar los cálculos [MAS, 1983, pp. 65-74].

Con esta aplicación Bel introdujo un nuevo tensor que es fundamental para la teoría de la radiación gravitacional, conocido como tensor de Bel-Robinson [DESER, 1999] en honor de los dos físicos, que introdujeron simultáneamente dicha solución, aunque el propio Robinson lo denomina exclusivamente tensor de Bel [ROBINSON, 1999]. La historia de la denominación de Bel-Robinson es curiosa. En un encuentro en Francia, Bel presentó el nuevo tensor en el que estaba trabajando, aunque todavía no lo había publicado. Cuando estaba explicándolo, el matemático americano Ivor Robinson intervino en tono coloquial al respecto afirmando que él había establecido un tensor igual y que era completamente simétrico. Bel no era consciente de esta característica de su tensor, hicieron allí mismo los cálculos y comprobaron que Robinson tenía razón. Robinson afirmó que él no había publicado nada al respecto, que sólo lo tenía en unas notas sueltas. Así que posteriormente se le denominó tensor de Bel-Robinson en honor de los dos²⁷.

Un aspecto interesante, desde el punto de vista histórico de la ciencia española, es que posiblemente, que sepamos, esta es la primera vez que se le da un nombre en honor a un científico español a un ente matemático propio de la Física Teórica y que realmente fuera utilizado y reconocido por la comunidad científica internacional²⁸.

En 1962 Bel culminó un trabajo sobre el problema de la energía en relatividad general y su relación con los estados de radiación [BEL, 1962], del que se ha destacado

su importancia científica, además de por ratificar la utilidad del nuevo tensor, por unificar diversos aspectos de la gravitación y su radiación que en principio parecían desconectados, ofreciendo una imagen completa y consistente de los mismos [SENOVILLA, 2000].

Como se comentó anteriormente, en 1965 Bel presentó una síntesis de su teoría en la primera reunión de física teórica organizada en España [BEL, 1965]. Esta circunstancia da idea de que su trabajo, aun desarrollándose en Francia, no pasaba desapercibido entre los físicos españoles, lo que probablemente influyera de forma determinante en la invitación posterior para su regreso a España.

Bel además ha sido pionero en el análisis teórico de la evolución dinámica de los púlsares binarios [SENOVILLA, 2000] y en estudios cuantitativos de su evolución, con aplicación al más famoso de todos ellos: el PSR 1913+16. El caso de los púlsares binarios es especialmente interesante porque en dicho sistema se produce una pérdida de energía en forma de radiación gravitacional. Esta línea de investigación se culminó en 1981 con un trabajo conjunto de Bel con los físicos franceses Thibault Damour y Nathalie Deruelle y los españoles Jesús Ibáñez y Chus Martín [BEL, 1981], en el que se estudia teóricamente el caso del pulsar binario como la interacción de dos partículas siguiendo el modelo de la MRP.

La Mecánica Relativista Predictiva

La Mecánica Relativista Predictiva se basa en el uso conjunto de los principios de predictividad y relatividad para su aplicación en la teoría de sistemas aislados de N partículas puntuales sin estructura. Según Bel, el principio de predictividad²⁹ puede parecer incompatible con el de relatividad, lo que es un error, y “este error ha sido la causa de que la Dinámica Relativista de los sistemas no haya sido, sino tardíamente, objeto del estudio que la importancia del problema justificaba” [BEL, 1977, p. 20]. La MRP de sistemas aislados la formuló Dirac en 1949, aunque no se empezó a aplicar a casos particulares hasta los años 60, gracias a la reformulación de la teoría por parte de varios físicos, entre otros Lluís Bel [BEL, 1971a]. Tradicionalmente, el problema clásico de los N cuerpos se trataba en el marco de la dinámica analítica clásica, pero Bel, en colaboración principalmente con su discípulo Chus Martín, extendió el estudio de la dinámica de los sistemas de N partículas al caso relativista.

La relación de trabajos de Bel y colaboradores suyos españoles es muy extensa en los años setenta, lo que da idea de una contribución realmente productiva y significativa de la física española en esta materia [BEL, 1970; BEL, SALAS y SÁNCHEZ RON, 1973; SALAS y SÁNCHEZ RON, 1974, BEL y FUSTERO, 1976; SANZ y MARTÍN, 1976; SÁNCHEZ RON, 1976; BEL, 1976]. En la UAM trabajaron sobre MRP los ya citados Martín, Salas, Sanz y Sánchez Ron. Ajeno al grupo de Bel en Madrid, también en Barcelona se desarrolló una línea de trabajo intensiva sobre MRP, estando a la cabeza Ramón Lapiedra y Lluís Mas, con Xavier Fusteró, Enric Verdaguer y Carles Bona.

Una de las aplicaciones de la MRP fue el estudio de sistemas rotantes. Para el caso de relatividad especial, para partículas con spin, este análisis lo realizaron Gracia Bondía [GRACIA-BONDÍA, 1980] y, mediante un estudio sistemático, Bel y Martín [BEL y MARTÍN, 1980, 1981]³⁰. Para el caso de la relatividad general se aplicó al estudio del pulsar binario mediante el trabajo citado anteriormente en el epígrafe sobre radiación gravitacional [BEL, 1981].

Pero a pesar de los esfuerzos dedicados a profundizar en la MRP, esta disciplina no logró asentarse en la comunidad internacional, abandonándose paulatinamente. Uno de los problemas fue que para el estudio de la Mecánica del punto material la comunidad científica adoptó la Teoría Cuántica de Campos, mientras que precisamente Bel buscaba una solución alternativa mediante la MRP. Respecto a esta cuestión afirmaba Bel:

Perquè existeix una mena de pensar que consisteix en dir que això no pot existir i que s'ha de passar directament de la mecànica del punt material a la teoria quàntica de camps. I això és la ortodòxia que segueix sent aquesta però jo crec que és incorrecte, hi ha col·legues que creuen que és incorrecte, però és una branca així marginada que jo considero fonamental però que ha quedat marginada i he passat una bona part de la meua vida treballant-hi [Bel, 2002]³¹.

De hecho, entre algunos especialistas españoles hay discrepancia sobre la conveniencia del excesivo uso de recursos dedicados a la MRP. Algunos consideran que este exceso de dedicación, tanto en tiempo como en personas, fue un error e incluso negativo para el desarrollo de la física teórica en España, por la cantidad de trabajos científicos y tesis doctorales irrelevantes, y por dedicar tantos recursos a una disciplina que acabó siendo marginal. En este sentido, según uno de estos mismos especialistas, cabe acusar a los discípulos de Bel de cierta falta de personalidad y creatividad científica³². En cambio, otros, aunque reconocen el quizá excesivo uso de recursos en MRP, creen que no fue ni un error ni una pérdida de tiempo, principalmente porque la MRP culminó exitosamente en el estudio del pulsar binario donde se aplicaron las herramientas de la MRP para el análisis de la interacción del modelo³³. Este trabajo fue fundamental para la posterior formulación que hicieron los físicos franceses Damour y Deruelle para analizar las medidas de los pulsares binarios [DAMOUR y DERUELLE, 1985, 1986]. A su vez este último modelo dio posteriormente consistencia teórica al descubrimiento por parte de Russell Hulse y Joseph H. Taylor de los pulsares binarios en 1974, lo que, en opinión de Chus Martín, facilitó la concesión del premio Nobel para los dos científicos en 1993. El propio Taylor indica que la interpretación de las medidas se basan en las ecuaciones obtenidas por Damour y Deruelle en 1985 [TAYLOR, 1993]. Además, Martín considera que el modelo teórico de la MRP puede ser de utilidad para el estudio de las interacciones que se analizan en los experimentos actuales con láseres de alta potencia para acelerar electrones. Por último, otros físicos especialistas en la materia consideran que la MRP tuvo un gran valor formativo para investigadores, aunque posteriormente se inclinaron por otras

líneas de investigación, y este uso de recursos implicó posteriormente un fuerte desarrollo de la Relatividad General en España.

Hay que contextualizar el caso de España en los años 70, donde se estaba iniciando el desarrollo investigador según las pautas de la ciencia internacional, por lo que era lógico que se siguiera las posibilidades de investigación proporcionadas por una figura internacional como Bel, independientemente del éxito final de su teoría. En definitiva, la MRP fue un medio de desarrollar la investigación en física teórica en España, y en concreto en Relatividad, como pudo haber sido cualquier otro medio asociado a otra línea de investigación. Ciertamente hubiera sido más productivo que ese medio no fuera una disciplina marginal, y el hecho de que se siguiera a Bel de forma un tanto acrítica, como se ha apuntado más arriba, puede explicarse por la falta de tradición investigadora en la España de esos años, que estaba empezando a producir ciencia según los estándares internacionales.

Soluciones de ecuaciones de campo

Otra tema de interés de Lluís Bel fue el estudio de soluciones de las ecuaciones de campo einstenianas en casos particulares y del uso de diferentes métricas³⁴. En estos aspectos colaboró con varios colegas franceses. También trabajó sobre geometría diferencial y teoría de operadores en formas tensoriales, así como en el análisis de singularidades en la solución de Schwarzschild³⁵ [BEL, 1957, 1969a, 1971b; BEL y ESCARD, 1966; BEL y HAMOUI, 1967; BEL y LÉAUTÉ, 1969].

Sobre estos temas Bel dirigió la tesis doctoral de su discípulo Chus Martín en la Universidad Autónoma de Madrid, que versó sobre soluciones de las ecuaciones de campo con el uso de la métrica de Kerr, denominada así en honor del matemático neozelandés Roy P. Kerr, que estableció dicha métrica en 1963. Como dato anecdótico esta tesis fue la primera en defenderse en la Facultad de Ciencias de la UAM. Martín estudió el espacio-tiempo estacionario con simetría axial, intentando entender la fuente del campo gravitatorio generado por la estructura de un fluido perfecto que gira rígidamente [MARTÍN, 1973].

Estos temas no tuvieron continuidad en España como líneas de trabajo inducidas por Bel, quizá la única aportación significativa en nuestro país al respecto fue, además de la ya citada de Martín, la de Sánchez Ron y Sanz que estudiaron las propiedades de unas soluciones particulares de la electrodinámica relativista establecida por el físico alemán Adriaan D. Fokker es 1929 [SÁNCHEZ RON y SANZ, 1975].

La Teoría Cinética de la Cosmología y los estudios teóricos de los cuántares.

En 1969 Bel planteó estudiar la dinámica de las galaxias considerándolas como partículas en el marco de la teoría cinética, lo que se ha dado en llamar la Teoría Cinética de la Cosmología [BEL, 1969b]. Definió una función de distribución, acorde con

dicha teoría cinética, demostrando que la desviación estándar al rojo es una función creciente de la distancia entre la fuente y el observador. Posteriormente estableció en España una línea de investigación en este campo, dirigiendo a los licenciados en Física por la UAM Enrique Álvarez y José M. Gracia Bondía, quienes en 1972 asistieron a la Escuela de Verano de Cosmología “Ettore Majorana”. En este encuentro tuvieron conocimiento de un hecho fundamental para sus intereses investigadores: los efectos cinéticos podrían explicar parte de la dispersión observada en el desplazamiento al rojo [GRACIA-BONDÍA, 1975].

En 1973 Enrique Álvarez y Lluís Bel aplicaron las herramientas de la relatividad general y la teoría cinética de la cosmología para realizar un estudio teórico sobre los datos observacionales de un quásar detectado en 1971, el 3C-279, quásar que por sus especiales características provocaría un fuerte impacto en la comunidad científica [ÁLVAREZ y BEL, 1973]. De su análisis dedujeron la posibilidad, como hipótesis alternativa pero coherente con los resultados, de que el valor de la velocidad de la luz pudiera haber cambiado con el tiempo. Obtuvieron una expresión de la variación de la velocidad de la luz en función de la constante de Hubble. Sabemos que ya se venía especulando con la posibilidad de variación con el tiempo de las constantes de la naturaleza. Por ejemplo, algunos modelos cosmológicos planteaban que la constante de gravitación pudo ser mayor en tiempos pasados [WILL, 1989, pp. 127-141]. Además, del análisis del corrimiento al rojo del 3C-279, se obtendrían velocidades de fuga superiores a la de la luz. En cambio, con la conjunción de la teoría cinética cosmológica y la relatividad general, los cálculos darían una velocidad de fuga menor que la de la luz. Recordemos que uno de los problemas que planteaban algunos autores para descartar la interpretación del corrimiento al rojo como fuga era la obtención de velocidades mayores que la de la luz.

En esos años había entre la comunidad científica diversas hipótesis para explicar el fuerte corrimiento al rojo de los quásares. Pues bien, entre nuestros científicos también hubo interesantes aportaciones al respecto. Enrique Álvarez y José Gracia Bondía consideraban que la distribución detectada de las rayas espectrales de los quásares es consistente con la teoría de que parte del fuerte desplazamiento al rojo es debido a perturbaciones físicas no relacionadas con los quásares [ÁLVAREZ y GRACIA-BONDÍA, 1974]. De esta forma existe una alta probabilidad de que la luz emitida por los quásares se vea influenciada por objetos interestelares de acuerdo con la Teoría Cinética de la Cosmología. Esto permite formular una función de correlación entre la absorción y la emisión del espectro de los quásares, con lo que se puede estimar la masa de los objetos que interactúan con la radiación proveniente de los quásares. Contrastaron la teoría formulada con datos observacionales, según una de las catalogaciones de quásares establecida en 1972.

La importancia de esta propuesta teórica, acorde con las observaciones, es que se puede compatibilizar con la termodinámica relativista, basada en una generalización del equilibrio Liouville. Esto permite explicar el corrimiento al rojo de algunos quá-

sares, sin que implique que su velocidad de fuga superara la velocidad de la luz, lo que era uno de los problemas de la interpretación del corrimiento al rojo como debida exclusivamente al efecto Doppler.

Anteriormente hemos indicado que tanto Enrique Álvarez como Gracia Bondía realizaron sus respectivas tesis doctorales, dirigidas por Bel sobre temas relacionados con la teoría cinética de la cosmología. Repasemos brevemente ambos trabajos.

En su tesis doctoral, Enrique Álvarez destacó la importancia de construir una teoría relativista consistente con la termodinámica y la física estadística. Para ello repasó los diversos intentos de construir una mecánica estadística, una termodinámica y una teoría cinética, relativistas. Su objeto era fundamentar la justificación física del equilibrio Liouville generalizado³⁶ y aplicar dicha generalización relativista a la teoría lineal de transporte que influye en los cálculos sobre viscosidad y propagación del calor. Como principal conclusión, Álvarez demuestra que la teoría de Bel era compatible con universo en expansión [ÁLVAREZ, 1975].

Por otra parte, la tesis doctoral de Gracia Bondía, tuvo por objeto estudiar la compatibilidad de las observaciones de los objetos cuasistelares con la hipótesis de que se mueven con velocidades muy altas con respecto al conjunto de la materia del Universo. Se solventarían así algunas paradojas que se pueden dar de la interpretación habitual por la cual la velocidad de recesión de los quásares, indicada por el corrimiento al rojo, está relacionada unívocamente con la distancia. De esta forma la teoría cinética de la cosmología puede tener aplicaciones sobre la dinámica de cúmulos galácticos, en la que son fundamentales los test de posible presencia de materia intergaláctica. Deduce Gracia Bondía las fórmulas teóricas para las distribuciones de magnitudes observables (magnitud aparente, desplazamiento al rojo, tamaño angular aparente). Con los cálculos se reexaminan los diferentes modelos cosmológicos desde el punto de vista cinético, que también es válido para analizar observaciones radioastronómicas. En su análisis se basó en las catalogaciones existentes en la época sobre quásares, concluyendo que la teoría cinética de la cosmología es compatible con las observaciones [GRACIA-BONDÍA, 1975].

Esta línea de investigación siguió obteniendo sus frutos, con varios trabajos de nuestros protagonistas, tanto individuales como en colaboración. Así, describieron un fluido cosmológico compuesto de dos tipos de gases, el de las galaxias y el de los quásares para lo que consideraron una función de distribución de equilibrio para el caso de los quásares, con la intención de lograr la compatibilidad de las ecuaciones de campo gravitatorias con las del equilibrio termodinámico de Liouville [ÁLVAREZ, BEL y GRACIA-BONDÍA, 1975].

Ya en solitario Álvarez trabajó sobre la generalización relativista del equilibrio de Liouville y sobre ecuaciones de transporte para un gas relativista, basándose en este caso en las conclusiones de Bel y Martín sobre sistemas conservativos en el marco de la Mecánica Relativista Predictiva [ÁLVAREZ, 1976a, 1976b].

CONCLUSIONES

El físico español Lluís Bel desarrolló su carrera investigadora en Francia, donde fue reconocido principalmente por sus contribuciones a la teoría de la Radiación Gravitacional y la formulación de un tensor usado en esta disciplina. Su breve estancia en la UAM, desde 1971 a 1973, fue esencial para consolidar un grupo de investigación estable sobre relatividad en aquella universidad. Especialmente provechosa fue su influencia cuando anteriormente en España no hubo en la práctica investigación sobre relatividad, más allá de aportaciones individuales o de divulgación. De esta forma, con el comienzo de la renovación de la ciencia española al final de la dictadura, entre otros motivos gracias al regreso a España de científicos relevantes como Bel, se produjo a su vez un auge de la física relativista en España. Pero este proceso fue complejo y tuvo altibajos. Así, el caso de Bel, al verse forzado a volver a Francia, ejemplifica las especiales circunstancias en el conflictivo periodo del final de la dictadura.

En España se hicieron aportaciones interesantes en Teoría Cinética de la Cosmología, estudios teóricos de los cuásares y los púlsares, no ya debido a una figura aislada de forma individual, sino por grupos de trabajo establecidos y con conexiones internacionales. A nivel cuantitativo también se produjo una importante producción en Mecánica Relativista Predictiva, pero este hecho motivó a su vez una controversia sobre la validez del uso excesivo de recursos. Algunos físicos protagonistas de esos años consideran que esta dedicación fue perjudicial para el desarrollo de la física relativista en España y otros defienden que este esfuerzo no supuso una pérdida de tiempo porque sirvió de recurso formativo para promocionar la investigación sobre relatividad en España y culminó con un análisis teórico de la evolución dinámica de los púlsares binarios, lo que ha tenido gran influencia en la escena de la astrofísica relativista. Además, la consolidación de los *Encuentros Relativistas Españoles* ha sido otro de los aspectos positivos de la influencia de Bel para la internacionalización de la física española.

Con este trabajo se ha pretendido mostrar un aspecto del desarrollo de la física relativista en España desde los años 1970, el protagonizado en el entorno de la UAM hasta 1980. Un estudio completo de dicho proceso requiere extender dicho análisis a otros grupos de investigación en esos años, principalmente los de la UB y UAB, así como aumentar la extensión temporal, lo que se plantea como un tema abierto de la Historia de la Física en España. También podría ser interesante realizar un estudio comparado sobre la posible controversia en torno a la MRP a nivel internacional, incidiendo en el impacto en el desarrollo de la física teórica en España en comparación con el de terceros países con mayor tradición científica, especialmente en Francia, donde la influencia de Bel también se dejó notar en torno a la MRP. Otro tema que consideramos de interés para investigaciones futuras, es el análisis de la influencia del trabajo de los españoles Bel, Martín e Ibañez, junto con los franceses Damour y Dereulle [BEL, 1981] para la concesión de Premio Nobel a Hulse y Taylor por el descubrimiento de los púlsares binarios, y por qué dicho trabajo se vio relegado

frente al posterior de los franceses [DAMOUR y DERUELLE, 1985, 1986], que sí se vio reconocido en este sentido.

APÉNDICE 1. NOTAS BIOGRÁFICAS DE PERSONAS ENTREVISTADAS

Jesús (Chus) Martín nació en 1944, se licenció en Físicas en 1966 por la Universidad Complutense de Madrid. Siguió en Madrid trabajando como discípulo de Julio Palacios pero en octubre de 1968 marchó a Francia a estudiar bajo la dirección de Lichnerowicz. En esta estancia conoció a Bel, quien le convenció para volver a España bajo su tutela, aprovechando que a él le invitaron a la UAM. Martín se doctoró en 1973 por la UAM y ha sido catedrático Física Teórica por la Universidad de Salamanca, jubilándose en 2013. Se considera a Martín el principal discípulo de Bel y el mismo se reconoce como un testigo de excepción de su carrera científica.

Enrique Alvarez se licenció en Físicas en 1970 por la UCM y se doctoró en 1975 por la UAM. Actualmente es catedrático de Física Teórica de la UAM. Aunque inicialmente sí fue discípulo de Bel en temas de Teórica Cinética de la Cosmología, posteriormente desarrolló su carrera investigadora en otros temas al margen de Bel.

Jose María Senovilla obtuvo la licenciatura en Físicas en 1982 y el doctorado en 1986, ambos títulos por la Universidad de Salamanca. Discípulo de Chus Martín, desarrolla su carrera investigadora principalmente en Relatividad y actualmente es catedrático de Física Teórica en la Universidad del País Vasco. No siendo discípulo directo de Bel, sí considera que su carrera científica ha sido influida por él.

Eduardo Ruiz se doctoró en Física 1984 por la Universidad de Salamanca con Chus Martín como director de tesis, estuvo en Francia con Lluís Bel, su carrera investigadora se centró en Relatividad General y Mecánica Cuántica Relativista. Actualmente es catedrático de Didáctica de las Ciencias Experimentales en la Universidad de Salamanca.

Juan Mari Aguirregabiria es doctor en físicas por la Universidad del País Vasco. Al igual que Ruiz, también realizó una estancia postdoctoral en París, donde colaboró con Bel. Ha trabajado en MRP, Relatividad General y caos determinista. Actualmente es Catedrático de Física Teórica por la Universidad del País Vasco.

José Manuel Sánchez Ron se licenció en Físicas por la UCM en 1971 y se doctoró en Físicas en 1978 por el University College London, fue profesor de Física Teórica en la UAM y actualmente es Catedrático de Historia de la Ciencia en la UAM. Se considera discípulo de Bel ya que se inició en la investigación bajo su dirección.

José Mariano Gracia Bondía, licenciado en Físicas por la UCM en 1970 y Doctor por la UAM en 1975. En 1976 marchó a Costa Rica donde obtuvo plaza de catedrático. Actualmente es Catedrático Humboldt por la Universidad de Costa Rica y Catedrático de Física Teórica por la Universidad de Zaragoza.

NOTAS

1. Este trabajo se basa, en parte, en varios apartados de la Tesis Doctoral *La Teoría de la Relatividad en la Física y Matemática Españolas* [SOLER, 2010], donde se analizan los temas aquí tratados en mayor profundidad, incluida formulación matemática. La novedad de este artículo respecto a dicha tesis es la inclusión de información relevante obtenida principalmente mediante entrevistas presenciales a Jesús (Chus) Martín (el principal discípulo de Bel) y a través de cuestionarios enviados a varios discípulos y/o colaboradores de Bel: Enrique Álvarez, José María Senovilla, Eduardo Ruiz, Juan María Aguirregabiria, José Manuel Sánchez Ron y José Gracia Bondía. En anexo aparece una breve nota biográfica de cada entrevistado. Agradezco a todos ellos su amabilidad y generosidad por el tiempo dedicado. También se aportan testimonios significativos de Lluís Bel, obtenidos en una entrevista al propio Bel realizada anteriormente por Alfons Carpio [BEL, 2002], y cuya información no estaba incluida en la tesis citada. Igualmente agradezco al *Centre d'Història de la Ciència* (CEHIC) de la *Universitat Autònoma de Barcelona* (UAB) el acceso al documento donde se transcribe dicha entrevista. Por último también hay información novedosa mediante consultas al Archivo de la UAM y prensa diaria de la época.
2. Lluís Mas es Catedrático de Física Teórica y profesor emérito de la Universidad de las Islas Baleares. Ramón Lapiedra, nacido en 1940, es catedrático de Física Teórica por la Universidad de Valencia, fue investigador del CNRS francés y rector de la Universidad de Valencia.
3. Para ampliación de datos biográficos de Bel, se puede consultar *Fundació Catalana per la Recerca* (1997) y Senovilla (2000).
4. André Lichnerowicz (1915-1998), físico matemático francés que destacó en geometría diferencial aplicada a la relatividad general y publicó obras de referencia consideradas como clásicas en relatividad. Se le considera uno de los físicos matemáticos más influyentes de la época [SÁNCHEZ RON, 2014, pp. 187-189].
5. Información suministrada por Chus Martín.
6. Según testimonio de Chus Martín en entrevista presencial realizada en octubre 2012.
7. *La Vanguardia* 12 noviembre 1983, pág. 22.
8. Según información obtenida de Juan Mari Aguirregabiria (diciembre 2014).
9. Esta idea la confirman la práctica totalidad de las personas entrevistadas.
10. Según opinión de Eduardo Ruiz y José Manuel Sánchez Ron respectivamente (cuestionarios diciembre 2014).
11. Carta de Luis Sánchez Agesta (por entonces Presidente de la Comisión Promotora de la UAM) a Nicolás Cabrera, 6 mayo 1969, Expediente Nicolás Cabrera, Archivo de la Universidad Autónoma de Madrid (en adelante Expediente N. Cabrera, Archivo UAM).
12. Carta de Nicolás Cabrera a Sánchez Agesta, 30 marzo 1969. Expediente N. Cabrera, Archivo UAM.
13. Esta ilusión de Bel por hacer ciencia en España y colaborar por su renovación científica la confirma Chus Martín.
14. *ABC*, 10 de enero 1970, p. 55.
15. Carta de Nicolás Cabrera a Villar Palasí (entonces el Ministro de Educación), 3 marzo 1970. Expediente N. Cabrera, Archivo UAM.
16. N. Cabrera, "Propuesta de ayuda para el desarrollo del departamento", documento sin fecha; "Informe de 19 mayo 1971 sobre departamento de Física de la UAM". Expediente N. Cabrera, Archivo UAM.
17. En el expediente de Jesús Martín que se conserva en el Archivo de la UAM no hay ningún documento que acredite su expulsión. Martín recuerda que se le entregó en mano una notificación de inicio del expediente de expulsión, pero que quedó temporalmente en suspenso gracias a la intervención del catedrático de física teórica de la UAM Francisco Ynduráin (1940-2008) en favor suyo. Pero durante este proceso Bel y Martín decidieron marchar a Francia ante la falta de confianza en las autoridades

- académicas. De esta forma probablemente no se llegó a hacer oficial la expulsión de Martín, quien por otra parte considera que sí fue expulsado.
18. Aspecto que también confirma Chus Martín en entrevista personal.
 19. *ABC*, 23 enero 1973, p. 44; 16 marzo 1973, p. 66.
 20. Al respecto hay que indicar que Julio Rodríguez sí que presionó a Cabrera e incluso llegó a apercibirle como consecuencia de unas declaraciones de Cabrera a la prensa en las que reflejaba la situación de conflictividad en la UAM. Carta del Rector de la UAM, Julio Rodríguez, a Nicolás Cabrera, 22 marzo 1973. Expediente N. Cabrera, Archivo UAM.
 21. Entrevista a Chus Martín, octubre 2012.
 22. Nos referimos a los años 1970 y principio de los 80. Posteriormente se crearían también grupos en las universidades del País Vasco, Valencia, Islas Baleares y Salamanca. En la del País Vasco destacarían Jesús Ibañez, Jose María Senovilla y Juan Mari Agirregaribia, en la de Valencia Ramón Lapiedra y Bartolomé Coll, en las Islas Baleares el grupo lo encabezaría Lluís Mas y en Salamanca Chus Martín y Eduardo Ruiz. También habría que considerar, a partir de 1977, los asociados con observatorios astronómicos y cuyo principal interés era la Astrofísica Relativista.
 23. Aunque José Luis Sanz se doctoró con Martín, y por tanto oficialmente es discípulo suyo, formó parte del grupo inicial en torno a Bel. Agradezco a J.M. Gracia Bondía esta información.
 24. Los acrónimos ERE y EREs se usaron frecuentemente, incluso en los títulos de las actas de dichos *Encuentros*. Inicialmente se usó el acrónimo EREs y posteriormente ERE. Véase Senovilla, 2014.
 25. Esta idea la confirma Martín: cuenta que cuando se juntaron para el curso se lo pasaron tan bien hablando sobre relatividad e intercambiando ideas sobre las investigaciones que cada uno llevaba a cabo, que decidieron repetir la experiencia al año siguiente.
 26. Entrevista J. Martín, octubre 2012.
 27. Según testimonio de Chus Martín en entrevistas realizadas en octubre y noviembre 2012.
 28. Anteriormente, en honor a Blas Cabrera, es conocida también la Ecuación-Ley de Cabrera-Weiss del paramagnetismo, que en realidad era una modificación de la ley de Curie-Weiss. a veces llamada también “de Cabrera-Duperier”. Agradezco a Francisco González Redondo esta información.
 29. El Principio de Predictividad en Mecánica Relativista sería el mismo que en Mecánica Clásica y consiste en que la evolución de todo un sistema aislado compuesto por n partículas puntuales sin estructura está regida por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden cuya solución depende de las condiciones iniciales.
 30. Cuando Gracia Bondía publicó este artículo ya llevaba varios años ejerciendo como profesor de la Universidad de Costa Rica, pero evidentemente su trabajo es producto de la influencia de Bel.
 31. Eduardo Ruiz afirma que el problema de la MRP es que su objetivo era construir una Mecánica Cuántica Relativista, pero ya se contaba con una herramienta muy eficaz, la Electrodinámica Cuántica (Cuestionario a Eduardo Ruiz, diciembre 2014).
 32. Sobre este aspecto, sería interesante comparar este caso con la actual polémica sobre la teoría de cuerdas, donde también se ha denunciado tanto un excesivo uso de recursos como la inercia de jóvenes investigadores que se ven obligados a trabajar en la teoría de cuerdas por la presión subyacente en torno a dicha línea de investigación. Véase SMOLIN, 2007, pp. 364-365.
 33. Esta es la opinión tanto de Chus Martín como de José Mariano Gracia Bondía. Otros entrevistados valoran dicho trabajo [BEL, 1981] como muy importante e incluso al que no se ha hecho justicia por su trascendencia. Pero, en cambio, no valoran tanto el método empleado, basado en la MRP, ya que se podía haber llegado a los mismos resultados mediante otras herramientas. Sobre este último aspecto, Martín defiende el éxito de la MRP porque, de hecho, se llegó a dichos resultados aplicándola.
 34. Una métrica es el criterio establecido para definir conceptos métricos, como por ejemplo distancia o ángulos, en un espacio determinado en el marco de la geometría diferencial.

35. Es la solución exacta de las ecuaciones de la relatividad general que en el caso límite se corresponde con la solución de la mecánica celeste newtoniana, solución que estableció el físico alemán Karl Schwarzschild (1873-1916) en 1916.
36. La ecuación de Liouville se usa en mecánica estadística clásica para representar cada uno de los microestados de un sistema correspondientes a un macroestado. El formulismo utilizado es el de la mecánica analítica en coordenadas generalizadas, lo que permite dar la ley de variación en función del tiempo de la probabilidad de presencia de una partícula, una vez obtenido el hamiltoniano del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, R. (2007) "El despliegue de la Universidad Autónoma de Barcelona entre 1968 y 1973: de fundación franquista a motor del cambio democrático en Cataluña". *Cuadernos del Instituto Antonio de Nebrija*, 10, 13-199.
- ÁLVAREZ, E. (1975) *El equilibrio Liouville en Relatividad General*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.
- ÁLVAREZ, E. (1976a) "On the generalized relativistic Liouville equilibrium". *Journal of Physics A*, 9(5), 687-696.
- ÁLVAREZ, E. (1976b) "On the transport equations for a one-component relativistic gas". *Journal of Physics A*, 9(11), 1861-1875.
- ÁLVAREZ, E. y BEL, L. (1973) "Generalized angular-velocity formula and kinematical analysis of 3C 279". *The Astrophysical Journal*, 179, 391-393.
- ÁLVAREZ, E. y GRACIA-BONDÍA, J.M. (1974) "Absorption Lines of Quasistellar Objects: A Kinematical Description". *Astronomy and Astrophysics*, 36(2), 299-303.
- ÁLVAREZ, E., BEL L. y GRACIA-BONDÍA, J.M. (1975) "Kinematical Description of Quasi-stellar Objects". *Astronomy and Astrophysics*, 40(4), 381-386.
- BEL, L. (1957) "Sur les discontinuités des dérivées secondes des potentiels de gravitation". *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 245, 2482-2485.
- BEL, L. (1958a) "Definition d'une densité d'énergie et d'un état de radiation totale généralisée". *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 246, 3015-3018.
- BEL, L. (1958b) "Sur la radiation gravitationnelle". *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 247, 1094-1906.
- BEL, L. (1958c) "Étude algébrique d'un certain type de tenseurs de courvure". *Comptes Rend. R. Acad. Sci. Paris*, 247, 2096-2099.
- BEL, L. (1959) "Quelques remarques sur la classification de Petrov". *Comptes Rend. R. Acad. Sci. Paris*, 248, 2561-2563.
- BEL, L. (1961) "Inductions électromagnétique et gravitationnelle". *Annales de l'Institut Henri Poincaré, Section A*, 17(1), 37-57.
- BEL, L. (1962) "Les états de radiation et le problème de l'énergie en relativité générale". *Cahiers de Physique*, 16, 59-80 [Reeditado en 2000 como "Radiation States and the problem of energy in General Relativity". *General Relativity and Gravitation*, 32(10), 2047-2078].
- BEL, L. (1965) "La radiación gravitacional". En: *Actas de la I Reunión de Física Teórica*. Santander, Universidad Internacional Menéndez Pelayo.
- BEL, L. (1969a) "Schwarzschild Singularity". *Journal of Mathematical Physics*, 10(8), 1501-1503.
- BEL, L. (1969b) "Kinetic Theory of Cosmology". *The Astrophysical Journal*, 155, 83-87.

- BEL, L. (1970) "Dynamique des Systemes de N Particules Pontuelles en Relativité Restreinte". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 12, 307.
- BEL, L. (1971a) "Predictive relativistic mechanics" *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 14(3), 189-203.
- BEL, L. (1971b) "Les Sources des Solutions Statiques de Schwarzschild et de Curzon". *General Relativity and Gravitation*, 1(4), 337-347.
- BEL, L. (1977) *Mecánica Relativista Predictiva. Curso impartido en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Barcelona, en mayo de 1976. UAB FT-34, junio 1977* [Documento inédito, copia proporcionada al autor por el propio Lluís Bel].
- BEL, L. (2002) "Lluís Bel, entrevista amb Alfons Carpio (24/02/2002)". En: *Servei d'Arxius de Ciència (Les Veus/Las Voces/Voices)* [Consultado el 15/2/2014].
- BEL, L. y ESCARD, J. (1966) "Problemes d'interpretation des ds stationnaires, rigides ou conformement rigides". *Rend. Accad. Naz. d. Lincei, ser VIII*, 41(6), 476-486.
- BEL, L. y HAMOUI, A. (1967) "Les conditions de raccordement en relativité générale". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 7(3), 229-244.
- BEL, L. y LÉAUTÉ, B. (1969) "Champ scalaire et configurations d'équilibre de grosses masses". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 10(3), 317-348.
- BEL, L. y MARTÍN, J. (1980) "Predictive relativistic mechanics of systems of N particles with spin". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 33(4), 409-442.
- BEL, L. y MARTÍN, J. (1981) "Predictive relativistic mechanics of systems of N particles with spin. II. The electromagnetic interaction". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 34(2), 231-252.
- BEL, L. y FUSTERO, X. (1976) "Mécanique relativiste prédictive des systèmes de N particules". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 25(4), 411-436.
- BEL, L., SALAS, A. y SÁNCHEZ RON, J.M. (1973) "Approximate solutions of Predictive Relativistic Mechanics for the Electromagnetic Interaction". *Physical Review D*, 7(4), 1099-1106.
- BEL, L., SANZ, J.L. y MARTÍN, J. (1976), "Systèmes non isolés de deux particules ponctuelles dans la cadre de la mécanique relativiste prédictive". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 24(4), 347-358.
- BEL, L.; DAMOUR, T.; DERUELLE, N.; IBÁÑEZ, J. y MARTÍN, J. (1981) "Poincaré-invariant gravitational field and equations of motion of two point like objects: The postlinear approximation of general relativity". *General Relativity and Gravitation*, 13(10), 963-1004.
- CARPIO, A. (2010) *Ciència i política exterior francesa a l'Espanya de Franco: el cas dels físics catalans*. Barcelona, Institut d'Estudis Catalans.
- DAMOUR, T. y DERUELLE, N. (1985) "General relativistic celestial mechanics of binary systems. I. The post-newtonian motion". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 43(1), 107-132.
- DAMOUR, T. y DERUELLE, N. (1986) "General relativistic celestial mechanics of binary systems. II. The post-newtonian timing formula". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 44(3), 263-292.
- DESER, S. (1999) "The Inmortal Bel Robinson Tensor". En: J. Martín *et al.* (eds.) *Relativity and Gravitation in general, Proceedings of the Spanish Relativity Meeting in Honour of 65th Birthday of Lluís Bel*. World Scientific, 35-44.
- ENCUENTROS RELATIVISTAS ESPAÑOLES (1983) *Actas de los Encuentros Relativistas 82*. Bilbao, Universidad del País Vasco.
- ENCUENTROS RELATIVISTAS ESPAÑOLES (1984) *Actas de los E.R.E 1983 (Palma de Mallorca)*. Universidad de Palma de Mallorca.

- FUNDACIÓ CATALANA PER A LA RECERCA (1997) *Premi de la Fundació Catalana per a la Recerca 1997*. Barcelona.
- GÁMEZ, C. (2004) *El Grupo de Investigación de Física Teórica (GIFT). Génesis y desarrollo histórico (1968-1976)*. Barcelona, CEHIC, UAB.
- GRACIA-BONDÍA, J.M. (1975) *Los objetos cuasiestelares y la teoría cinética de la cosmología*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.
- GRACIA-BONDÍA, J.M. (1980) "World-line conditions for spinning particles: there are always spin-orbit forces". *Physics Letters A*, 75(4), 262-264, doi:10.1016/0375-9601(80)90557-5.
- KRAGH, H. (2007) *Generaciones cuánticas. Una historia de la física en el siglo XX*. Akal [Traducción de la 1ª edición en inglés, 1999].
- HERRAN, N. y ROQUÉ, X. (2012) "Los físicos en el primer franquismo: conocimiento, poder y memoria". En: N. Herran y X. Roqué (eds.) *La física en la dictadura. Físicos, cultura y poder en España (1939-1975)*. Universitat Autònoma de Barcelona, 85-104.
- MARTÍN, J. (1973) *Simetría axial en relatividad general. Métrica de Kerr*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.
- MARTÍN, J. ; RUIZ, E.; ATRIO, F. y MOLINA, A. (eds.) (1999) *Relativity and Gravitation in General. Proceedings of the Spanish Relativity Meeting in Honour of the 65th Birthday of Lluís Bel*. World Scientific.
- MARTÍN, J. y MOLINA, A. (1999) "Foreword". En: Martín *et al.* (eds.) *Relativity and Gravitation in General. Proceedings of the Spanish Relativity Meeting in Honour of 65th Birthday of Lluís Bel*. World Scientific, v-vi.
- MAS, L. (1983) *Soluciones exactas en relatividad general*. Madrid, Editorial Complutense, 65-74.
- ROBINSON, I. (1999) "Energy, Radiation, and the Bel Tensor". En: Martín *et al.* (eds.) *Relativity and Gravitation in General. Proceedings of the Spanish Relativity Meeting in Honour of 65th Birthday of Lluís Bel*. World Scientific, 75.
- SALAS, A. y SÁNCHEZ RON, J.M. (1974) "Predictive Solutions of Classical Electrodynamics". *Il Nuovo Cimento*, 20B, 209-223.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (1976) "Approximate solutions of predictive relativistic mechanics for the gravitational interaction". *Journal of Physics A*, 9(11), 1877-1885.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (2003a) "La Física en España (IV): La era franquista". *Revista Española de Física*, 17(4), 7-13.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (2003b) "La Física en España (V): una nueva era". *Revista Española de Física*, 17(5), 5-10.
- SÁNCHEZ RON, J.M. (2014) *El mundo después de la revolución. La física de la segunda mitad del siglo XX*. Barcelona, Ediciones de Pasado y Presente.
- SÁNCHEZ RON, J.M. y SANZ, J.L. (1975) "Momentum and angular momentum for some exact solutions of Fokker's electrodynamics". *Journal of Physics A*, 8(12), 1975-1981.
- SANZ, L. (1997) *Estado, ciencia y tecnología en España: 1939-199*. Madrid, Alianza Editorial.
- SANZ, J.L. y MARTÍN, J. (1976) "Systèmes non isolés de deux particules ponctuelles dans la cadre de la mécanique relativiste prédictive". *Ann. Inst. H. Poincaré A*, 24(4), 347-358.
- SENOVILLA, J.M. (2000) "Editor's Note Radiation States and the Problem of Energy in General Relativity". *General Relativity and Gravitation*, 32(10), 2043-2046.
- SENOVILLA, J.M. (2014) "Breve Historia de los ERE" [Disponible en: <http://www.segre.es/es/historia.shtml>, consultado el 11-2-2014].

- SMOLIN, L. (2007) *Las dudas de la física en el siglo XXI. ¿Es la teoría de cuerdas un callejón sin salida?* Barcelona, Crítica [Traducción de la 1ª edición en inglés, 2006].
- SOLER, P. (2010) *La Teoría de la Relatividad en la Física y Matemática Españolas*. Tesis Doctoral, UCM Madrid.
- SOLER, P. (2012) “La Teoría de la Relatividad en la ciencia española entre 1940 y 1970”. En: N. Herran y X. Roqué (eds.) *La física en la dictadura. Físicos, cultura y poder en España (1939-1975)*. Universitat Autònoma de Barcelona, 123-140.
- SUCHUNKING, E.L. (1989) “The First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics”. *Physics Today*, 42(8), 46-52.
- TAYLOR, J.H. (1993) “Binary pulsars and relativistic gravity”. Nobel Lecture, December 8, 1993 [Disponible en: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/taylor-lecture.pdf, consultado el 12-2-2014].
- VALERA, M. y LÓPEZ, C. (2001) *La Física en España a través de los Anales de la Sociedad Española de Física y Química 1903-1965*. Universidad de Murcia.
- WILL, C. (1989) *¿Tenía razón Einstein?, la espectacular confirmación científica de la teoría de la relatividad*. Barcelona, Gedisa editorial [Traducción de la 1ª edición en inglés, 1986].