
LA ORDEN DEL CABALLERO BONDI

Willians Barreto

RESUMEN

Se narra la relación directa e indirecta del físico británico de origen austríaco, Sir Hermann Bondi, con la física venezolana. Se hace especial énfasis en sus cualidades humanas más notables, nobleza y humildad, aparte de su importante contribución a la Relatividad General y a la organización de la ciencia

européa. Auto-declarado como un leal seguidor de la filosofía popperiana, Bondi defiende a la “dura y sucia” física en contraposición a la “inmaculada y bella” física. Se centra atención en dos piedras angulares de la obra de Bondi, seguidas a profundidad por Luis Herrera y discípulos en Venezuela.

La caballería está asociada a la nobleza; cierta actitud incorruptible siempre a prueba en el crisol del tiempo, imbatible bajo cualquier circunstancia. Así era Sir Hermann Bondi, noble. Así son Luis Herrera y Jeffrey Winicour. Como suelen decir las abuelas, “ese material, ya no sale más”. Al parecer, Bondi también era humilde, muy lejos de padecer el síndrome de las *vedettes* en el firmamento de la ciencia global. Algo bastante poco usual, considerando que Bondi es referenciado por la Enciclopedia Británica y que fue Director de la Agencia para la Investigación Aeroespacial Europea, organización equivalente a la NASA. Hubiera sido estupendo conocerle en persona... y pensar que se es-

tuvo cerca. A continuación se elaborará una breve semblanza de Hermann Bondi, basada en pocas anécdotas y escritos suyos, sustantivos e iluminadores. Luego se abordará una revisión no rigurosa de dos trabajos de la obra de Bondi. Estos trabajos han sido objeto de estudio en Venezuela por Luis Herrera y sus discípulos.

Desde los años cincuenta se realizan cursos de verano sobre Relatividad en distintas partes del mundo. Uno de esos cursos se realizó en el King's College, en Londres. A éste asistió el joven americano Jeffrey Winicour, doctorado en la Universidad de Syracuse bajo la dirección de Peter Bergmann, quien trabajó con Einstein. Winicour es fundador

del Grupo de Relativistas de Pittsburgh, junto con Ezra Ted Newman y Allen Janis. Trabajar con Winicour ha sido una fortuna, si se tiene además en común el gusto por montar bicicleta y fumar puros. En una de esas charlas de sobre mesa en el porche de su casa y bajo los efluvios del tabaco, Jeff comentó que había conocido a Bondi (en cuya obra Winicour basó la suya). Recordó algo así: “Esperábamos por la clase siguiente y un señor se apareció a la hora, justo antes de la clase, a borrar el pizarrón. Todos estábamos algo distraídos esperando al profesor. El señor de la limpieza comenzó a dirigirse al auditorio... supimos de inmediato que era Bondi. Estábamos desconcertados,

llevaba la camisa arremangada y -como una guayabera- por fuera. Quedamos atrapados en el acto por su personalidad afable y por su profundidad con el fluir del discurso de la clase magistral.”

Quedó callado entre volutas. Winicour dijo entonces que estábamos en una especie de “recesión relativista”. Hay pocos relativistas numéricos y una vez formados se han visto atraídos por el sector financiero o la industria. Hacen falta caballeros para la causa, para entender cada vez más. Seguro que la comunidad ha crecido, sin duda, pero no necesariamente la calidad en la misma proporción. También es claro que se ha profundizado, pero la industria de artículos sobre los

PALABRAS CLAVE / Física en Venezuela / Gravitación / Hermann Bondi /

Recibido: 08/12/2008. Modificado: 24/04/2009. Aceptado: 27/04/2009.

Willians Barreto. Doctor en Física, Universidad Central de Venezuela. Licenciado y Magister en Física, Universidad

de Oriente, Venezuela. Profesor, Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Dirección: Centro de Física Fundamental,

Facultad de Ciencias. ULA, Mérida, Venezuela. e-mail: wbarreto@ula.ve

KNIGHT BONDI'S ORDER

Willians Barreto

SUMMARY

The direct and indirect relationship between the British physicist originally from Austria, Sir Hermann Bondi, and Venezuelan physics are presented. Special emphasis is made of his most remarkable human qualities, nobility and humbleness, besides his important contribution to General Relativity and to the

European science agencies. Self-declared as a staunch disciple of Popperian philosophy, Bondi defended the “hard and dirty” physics against the “immaculate and beautiful” physics. Attention is focused on two cornerstones of Bondi's work, followed thoroughly by Luis Herrera and disciples in Venezuela.

A ORDEM DO CAVALEIRO BONDI

Willians Barreto

RESUMO

Narra-se a relação direta e indireta do físico britânico de origem austríaco, Sir Hermann Bondi, com a física venezuelana. Coloca-se especial ênfase em suas qualidades humanas mais notáveis, nobreza e humildade, além de sua importante contribuição para a Relatividade Geral e para a organização

da ciência européia. Auto-declarado como um leal seguidor da filosofia popperiana, Bondi defende a “dura e suja” física em contraposição à “imaculada e bela” física. Centra-se a atenção em duas pedras angulares da obra de Bondi, seguidas em profundidade por Luis Herrera e discípulos na Venezuela.

aspectos más “rentables” de la Relatividad General, como más o menos dice Luis Herrera, francamente domina el medio.

En el obituario de la BBC de Londres sobre Bondi se lee que después de su desacreditado modelo cosmológico del estado estacionario, Bondi se dedicó a estudiar la física de los agujeros negros. Esto no es totalmente cierto. Aunque publicó algunos trabajos sobre agujeros negros, la mayor contribución de Bondi a la Relatividad General fue el estudio y comprensión de la radiación gravitacional. El modelo del estado estacionario propuesto en coautoría con Hoyle y Gold, visto en retrospectiva y en su contexto histórico, resulta atractivo y audaz (Bondi y Gold, 1948). Por cierto, Bondi conoce a Thomas Gold en una reclusión preventiva en Canadá. Como inmigrantes austríacos en el Reino Unido se les investigó al comenzar la segunda guerra mundial; luego ambos se reunieron con Fred

Hoyle en un proyecto sobre radares en el Almirantazgo Británico. Su visión sobre la acreción condujo a Hawking a formular la radiación proveniente de agujeros negros. Bondi fue nombrado Caballero del Reino Unido en 1973.

La primera referencia que tuve de Bondi fue por el año 1987, cuando el tutor y sensei Luis Herrera señaló, para una revisión profunda, un artículo (Herrera *et al.*, 1980) que representaba en cierto modo la continuación de otro artículo

de 1964 cuyo autor es Hermann Bondi. Más adelante se regresará con detalle sobre este último trabajo, cuya riqueza no se ha explotado tanto como el trabajo sobre radiación gravitacional del año 1962. Cabe mencionar que Luis Herrera es graduado *summa cum laude* por la Universidad Patricio Lumumba de Moscú y luego doctorado en el Instituto Henri Poincaré de París, bajo la dirección de Achille Papapetrou, quien a su vez y a su tiempo trabajó con Erwin Schrödinger.

En 1992 Bondi publicó un trabajo sobre colapso gravitacional en distribuciones anisótropas (Bondi, 1992). Luis Herrera, aunque ya había publicado un notable número de trabajos sobre el tema, no figuraba referenciado en el artículo de Bondi. Tomó un sobre manila y adjuntó sin explicación al destinatario un cartapacio de artículos sobre anisotropía en distribuciones

Estimado Dr Herrera,

Por favor, acepte mis profundas disculpas por la fallida referencia en mi artículo (M.N.R.A.S. 259. 365-368, 1992) al extenso trabajo que usted y sus colegas han realizado sobre esferas anisótropas en Relatividad General. Todavía no logro entender cómo pudo suceder esto, por cuanto pensé había realizado una búsqueda adecuada en la que había involucrado a un muy reconocido colega. Sin embargo, la responsabilidad por esta desafortunada omisión es completamente mía.

De la lectura de los artículos que usted tan amablemente me ha enviado me parece que la optimización particular que emprendí no repite cualquiera de sus trabajos, aunque en el de 1980 con Cosenza, Esculpi y Witten la acotación que sigue a la ecuación (21) señala hacia el área que exploré. Mi mortificación fue mayor por sus generosas referencias a mi trabajo previo.

Estoy escribiendo al Editor de M.N. preguntándole si me permite publicar una nota de disculpas, quizás como un erratum. Para asegurarme que lo he hecho bien, esta vez me gustaría enviarle un fax con la nota, de tal forma que usted pueda señalarme cualquier error ¿podría usted en consecuencia enviarme su número de fax?

Por favor, transmita mis disculpas también a sus colegas. Confío en que mi esperada nota en M.N. pueda ser vista por ellos a su debido tiempo.

Una vez más con mis disculpas,

Atentamente,

Hermann Bondi

Figura 1. Carta de Bondi a Herrera, 26 de enero de 1993.

esféricas y su efecto sobre el colapso gravitacional (Herrera *et al.*, 1979; Cosenza *et al.*, 1981; Cosenza *et al.*, 1982; Herrera *et al.*, 1984; Herrera y Ponce de León, 1985; Herrera y Núñez, 1989; Herrera, 1992; Chan *et al.*, 1992). A vuelta de correo recibió una misiva fechada el 26 de enero de 1993, que traducimos íntegra y libremente y se muestra en la Figura 1. Desde entonces Bondi no faltaba en casa de los Herrera-Di Prisco con una tarjeta cada Navidad.

En mayo del año 2000 Bondi visitó a Herrera en Salamanca, de lo cual es testimonio fotográfico la Figura 2. Para entonces su Parkinson estaba muy avanzado y tomaba unas grageas fulminantes que de vez en cuando lo desconectaban de la línea central del mundo. Pero en su charla magistral fue lúcido, afable, humilde, contundente y locuaz, como siempre. Un caballero de la luz que iluminó la gravitación. Bondi fue condecorado por las autoridades de la Universidad de Salamanca.

De vuelta en Londres, Bondi hace referencia a su visita y sobre todo al trabajo de Luis Herrera. En una carta fechada el 17 de mayo del año 2000, muestra su genuino interés por la física (ver traducción libre en la Figura 3). De esta última carta sorprende la actividad y lucidez de Bondi a sus 81 años. Pero sobre todo es gratificante el entusiasmo y la alegría que manifestó por un artículo más en el zurrón. Esto permite señalar lo siguiente: el último trabajo publicado es el más importante.



Figura 2. Herrera y Bondi en Salamanca, mayo del 2000

Pero esto no es cierto en la obra singular de Bondi. Como se verá, entre los años 1962 y 1964 publicó dos joyas de la literatura en *Relatividad General*.

Bondi y Herrera mantuvieron comunicación durante unos diez años. Luego de la visita a Herrera en Salamanca ocurrió un incidente que vale la pena mencionar y que, una vez más, ayuda a entender el talante noble de Sir Hermann Bondi. Luis Herrera, por ser extranjero, fue impedido de ocupar una plaza permanente en la Universidad de Salamanca. Bondi indignado intentó publicar una carta de protesta en *Nature*. El Editor evadió a Bondi, indignándose éste aún más. Pidió disculpas a Herrera insistentemente y mostró preocupación por el regreso de la familia a Caracas.

Es ejemplarizante que Bondi, habiendo ocupado cargos de altísimo rango en Europa y en Inglaterra, mantuviera un vivo interés por la investigación durante toda su carrera y que a la vez fuera notable y abrumadoramente humilde. Es indudable la enorme estatura de Bondi, quien entregó su vida al servicio de la ciencia. Fue influyente en la dinámica del mundo real, matemático, astrofísico, cosmólogo, pero sobre todo fue un Caballero de la Ciencia. Publicó trabajos con figuras legendarias como Pirani (Bondi y Pirani, 1989), Sciama (Bondi *et al.*, 1954) y Rindler (Bondi y Rindler, 1991). Es preciso y conveniente concluir esta primera parte haciendo referencia explícita a una reseña que escribió Bondi en *Nature* sobre el libro de S. Chan-

Estimado Luis,

La vida aquí desde mi regreso ha sido absolutamente frenética; por eso el retraso en escribirte esta carta. Los días que pasé en Salamanca fueron los más agradables y gratos para mí y deseo agradecer a ti, a tu esposa, a Jesús Martín y a los demás (incluyendo a tus hijos) por tan cálidos, placenteros e interesantes momentos.

El retorno al aeropuerto de Madrid fue rápido, con una breve 'parada de confort' en un pequeño café del camino. Mi vuelo estuvo bien, con un ligero retraso. Pasé el tiempo en el aeropuerto comiendo y leyendo, especialmente disfrutando tus artículos. El uso de un giróscopo -Bondi se refiere a la detección de radiación gravitacional- representa una forma eficiente para aclarar situaciones relativistas en un escenario relevante. Quedé particularmente complacido con tu artículo sobre 'relajación', como he insistido repetidamente en cuanto a la necesidad de considerar relaciones constitutivas realistas junto con las ecuaciones de campo. Esto debe requerir una dependencia temporal para la respuesta del material a los esfuerzos gravitacionales. Solo de esta forma la fricción de marea puede entrar en el análisis. Para el pulsar binario de Taylor es importante mostrar que la fricción de marea tiene mucho menos influencia sobre la evolución de la órbita que la reacción radiativa. No estoy al tanto si ya esto está establecido satisfactoriamente. (Pudieras estar interesado en saber que hace cincuenta años publiqué un artículo sobre el efecto límite de la velocidad del sonido en el océano sobre la rapidez de las olas).

Ayer recibí la feliz noticia de que mi artículo sobre ondas gravitacionales (del cual hiciste una fotocopia) ha sido aceptado por la Sociedad Real, con un árbitro entusiasta con el trabajo y otros que lo aprobaron en tonos más moderados.

Otra vez muchas gracias: Me dieron momentos muy placenteros y sólo puedo esperar que ustedes los hayan disfrutado también.

Con mis mejores deseos para todos,

Hermann

Figura 3. Carta de Bondi a Herrera, 17 de mayo del 2000.

drasekhar titulado: *Verdad y Belleza: Estética y Motivaciones en la Ciencia* (Chandrasekhar, 1987; Bondi, 1988), excelente libro por demás:

“LO BUENO, LO MALO Y LO FEO

Hermann Bondi

¡Qué libro tan espléndido! Su lectura es un placer, y para mí, al menos, la lectura continua se hizo compulsiva. El hecho que consista en un compendio de charlas (una de 1946, y las otras de distintas fechas entre 1975-1986) significa que cada una de las secciones son autocontenidas, y que además casi no hay solapamiento o repetición. Chandrasekhar es un distinguido astrofísico y cada una de sus charlas posee el sello de toda su obra: precisión, profundidad, lucidez. Lo que quizás no vislumbré fue la profunda formación histórica del autor. Me apresuro en agregar que me resultó claro que si Chandrasekhar decide hablar sobre asuntos históricos o artísticos, su estudio será realizado a la perfección; lo que no resultó obvio fueron los tantos aspectos de estos temas que no figuran en sus conferencias...

Confío en que ningún lector de esta reseña pueda pasar desapercibido mi entusiasmo por el libro, aun cuando debo también hacer algunas acotaciones críticas puesto que algunos aspectos del contenido no se ajustan al panorama que tengo de la ciencia. Primero, para un leal discípulo como yo de Popper, lo que hay sobre filosofía de la ciencia en el libro es incompleto, porque no posee algún tipo de perspectiva Popperiana. Segundo, el título del libro me produjo picazón (aunque, afortunadamente para mí disfrute, finalmente esto resultó irrelevante). Soy quizás más cauteloso que Popper en asignar verdad a la ciencia, y también tengo poca fe en la utilidad de la belleza como guía luminosa. No solamente me perturba la subjetivi-

dad en el reconocimiento de la belleza, sino que me parece confunde a la gente o emerge solamente después de una contribución original. Así, Chandrasekhar escribe bien y correctamente sobre la irrelevancia para la nueva ciencia de buena parte de los últimos trabajos de Eddington, de Einstein y de Milne. Estos trabajos fueron guiados en buena medida y al extremo por consideraciones de belleza, especialmente belleza matemática, y muy poco por la dura y sucia física. De nuevo, cuando Dirac, en su primera contribución excepcionalmente buena, produjo la ecuación relativista del electrón, su desgarbo y fealdad fueron proclamadas. Posteriores trabajos, de Dirac y otros, condujeron a nuevas formulaciones igualmente excepcionales en su belleza. De igual forma, cuando surgieron los agujeros negros en la teoría, no había algo particularmente elegante en las ecuaciones. Mucho después, el mismo Chandrasekhar, en su espléndido libro *Teoría Matemática de los Agujeros Negros*, compiló su propio trabajo y el de muchos otros para revelar los patrones de una extraordinaria belleza. No digo que mostrar los descubrimientos originales de una forma concisa y mediante descripciones elegantes sea considerablemente útil para los que trabajarán posteriormente en el tema, sino que evidentemente esto no contribuyó a los descubrimientos mismos. La belleza puede ser una excelente guía en matemáticas, pero dudo que tenga algún valor en la física. Esta exhibición de ligera petulancia en mis puntos de vista, posiblemente heterodoxos, no debería ser óbice para que cualquier lector potencial disfrute este excelente libro, como yo lo hice a cabalidad.”

Se ha intentado, ojalá se haya logrado, mostrar los signos de una personalidad singular. Ahora se centrará la atención en un aspecto técnico

del genio y obra de Bondi, a través de dos artículos que representan una rica fuente de ideas y que se mantienen casi incólumes después de cuarenta años. También se intentará revisar, sin profundidad, el trabajo que se ha realizado en Venezuela relacionado directamente con el de Bondi.

La obra de Bondi se puede clasificar en cuatro grandes áreas: modelos cosmológicos, modelos de acreción, modelos esféricos y radiación gravitacional.

El trabajo *Gravitational Waves in General Relativity. VII. Waves from Axi-Symmetric Isolated Systems* de Bondi *et al.* (1962) es fundamental para la Relatividad General. Aunque restringido a la simetría axial y de reflexión, estableció las bases para la comprensión de la radiación gravitacional fuera del contexto lineal. Inmediatamente se valoró este trabajo y fue generalizado por Sachs (1962a). Fue descubierta la existencia de un grupo de simetría denominado ahora el Grupo de Bondi-Metzner-Sachs (BMS; Sachs, 1962b) justamente a partir del trabajo de Bondi y en el intento de definir energía al menos en espaciotiempos asintóticamente planos. Bondi y colaboradores introdujeron una restricción innecesaria al hacer una analogía con el electromagnetismo (Frauendiener, 2004). Pero no es posible evitar radiación entrante mediante la condición de Sommerfeld, debido al carácter no lineal de la Relatividad General. El tratamiento conformal del infinito resolvió técnicamente estos “detalles” (Wald, 1984). Se puede decir que el trabajo de Bondi-Sachs fue generalizado por Winicour y Tamburino (1965). Gracias a ello es posible hoy en día simular la radiación gravitacional proveniente de sistemas aislados, usando el calibre de Bondi. Se debe señalar que no ha sido posible construir un espaciotiempo globalmente regular a partir del referencial de Bondi en el infinito-nulofuturo. Pero tampoco hubiera sido posible el desarrollo de los códigos en la formulación

característica sin la piedra preciosa de 1962.

Ahora bien, resulta curioso que el trabajo titulado *The contraction of gravitating spheres* (Bondi, 1964), haya recibido atención prácticamente solo desde Venezuela. En este trabajo Bondi estudia el problema de una distribución material esférica introduciendo la noción de observadores comóviles con el fluido y localmente minkowskianos. Esto permite definir las variables físicas y en consecuencia una descripción transparente de la dinámica. Aunque el tratamiento es en un referencial no comóvil, la definición de variables físicas para observadores apropiados excluye toda posible ambigüedad en la interpretación de los resultados. La evolución lenta es posible desde su enfoque y extrae ciertos resultados generales para un fluido adiabático, haciendo consideraciones físicas razonables. Bondi critica la idea innecesaria de suponer adicionalmente una ley de conservación de bariones, ya que en Relatividad General la noción de partícula no existe. Hasta donde tenemos conocimiento esta afirmación de Bondi no ha sido rebatida. Extraña además que el tratamiento de observadores comóviles en el local minkowskiano no sea el tratamiento estándar para incorporar materia en Relatividad General. Por si fuera poco, en una segunda parte del artículo se adaptan las coordenadas de radiación para estudiar problemas no adiabáticos o de radiación profusa, acercándose más a una situación realista y plantea un posible esquema para la obtención de modelos. Dieciséis años más tarde Herrera *et al.* (1980) proponen un método seminumérico que retomaba las ideas originarias en este trabajo de Bondi y que posteriormente se interpretaría como la aproximación post-casi-estática (Herrera *et al.*, 2002). En una revisión bibliográfica profunda se ha podido constatar que con excepción de los relativistas venezolanos, este trabajo de Bondi ha permanecido “dormido” inexplicablemente, en lo referente al tratamiento de

la materia. Su extensión, uso y difusión se debe a Luis Herrera y colaboradores. El tratamiento de materia en la formulación característica estándar de la Relatividad Numérica no hace referencia a los observadores comóviles en el local minkowskiano de Bondi. Ni siquiera en la versión actual más general y poderosa, como herramienta, de Siebel *et al.* (2002).

Es importante señalar que Christodoulou (1986a, b; 1987a, b) con propósitos analíticos, y Goldwirth y Piran (1987) y Gómez y Winicour (1992), con propósitos numéricos, usaron la métrica de Bondi (de radiación) bajo simetría esférica en el contexto del colapso de un campo escalar autogravitante. Este sistema es el más sencillo posible para estudiar el colapso gravitacional, así como el sistema del trabajo de 1962 es el más sencillo para estudiar radiación gravitacional. Aunque idealizado y con poco, si acaso ningún, contenido físico, condujo al descubrimiento del comportamiento crítico (Choptuik, 1993). Es interesante observar que a la vez el problema del campo escalar sin masa, esto es, la radiación escalar, guarda estrecha relación con el problema de la radiación gravitacional, magistralmente estudiado por Bondi y colaboradores en el trabajo de 1962.

La orden del Caballero Bondi es continuar con su honorable tradición. Es explorar por qué su trabajo de 1964 no ha sido valorado entre los relativistas numéricos, en lo referente al tratamiento de la materia. Es

preciso preguntarse: ¿por qué el enfoque de los observadores comóviles localmente minkowskianos de Bondi no es el estándar en Relatividad Numérica ¿será que la heterodoxia no favorece a la industria de estrellas en el firmamento?

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Luis Herrera, Alicia Di Prisco, Jeffrey Winicour, Luis Rosales y Carlos Peralta por motivar la presentación de esta semblanza de Bondi y por sus comentarios.

REFERENCIAS

- Bondi H (1964) The contraction of gravitating spheres. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 281: 39-48.
- Bondi H (1988) The good, the bad and the ugly. *Nature* 331: 668-668.
- Bondi H (1992) Anisotropic spheres in general relativity. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 259: 365-368. Addendum (1993) 262: 1088-1088.
- Bondi H, Gold T (1948) The steady-state theory of the expanding Universe. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 108: 252-252.
- Bondi H, Pirani F (1989) Gravitational Waves in General Relativity. XIII. Caustic Property of Plane Waves. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 421: 395-410.
- Bondi H, Rindler W (1991) The multipole expansion far from an isolated source. *Gen. Relat. Grav.* 23: 487-493.
- Bondi H, Gold T, Sciamia D (1954) A Note on the Reported Color-Index Effect of Distant Galaxies. *Astrophys. J.* 120: 597-599.
- Bondi H, van de Burg MGJ, Metzner AWK (1962) Gravitational Waves in General Relativity.

VII. Waves from Axi-Symmetric Isolated Systems. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 269: 21-52.

Chan R, Herrera L, Santos N (1992) Dynamical instability in the collapse of anisotropic matter. *Class. Quant. Grav.* 9: L133-L135.

Chandrasekhar S (1987) *Truth and Beauty, Aesthetics and Motivations in Science*. University of Chicago Press. Chicago, EEUU. 170 pp.

Christodoulou D (1986a) The problem of a self-gravitating scalar field. *Comm. Math. Phys.* 105: 337-361.

Christodoulou D (1986b) Global existence of generalized solutions of the spherically symmetric Einstein-scalar equations in the large. *Comm. Math. Phys.* 106: 587-621.

Christodoulou D (1987a) The structure and uniqueness of generalized solutions of the spherically symmetric Einstein-scalar equations. *Comm. Math. Phys.* 109: 591-611.

Christodoulou D (1987b) A mathematical theory of gravitational collapse. *Comm. Math. Phys.* 109: 613-647.

Choptuik M (1993) Universality and scaling in gravitational collapse of a massless scalar field. *Phys. Rev. Lett.* 70: 9-12.

Cosenza M, Herrera L, Esculpi M, Witten L (1981) Some models of anisotropic spheres in general relativity. *J. Math. Phys.* 22: 118.

Cosenza M, Herrera L, Esculpi M, Witten L (1982) Evolution of radiating anisotropic spheres in general relativity. *Phys. Rev. D* 25: 2527-2535.

Frauenfelder J (2004) Conformal infinity. *Living Rev. Relat.* 7: 90 pp. En www.livingreviews.org/lrr-2004-1

Goldwirth D, Piran T (1987) Gravitational collapse of massless scalar field and cosmic censorship. *Phys. Rev. D* 36: 3575-3581.

Gómez R, Winicour J (1992) Asymptotics of gravitational collapse of

scalar waves. *J. Math. Phys.* 33: 1445-1457.

Herrera L (1992) Cracking of self-gravitating compact objects. *Phys. Lett. A* 165: 206-210.

Herrera L, Núñez L (1989) Modeling 'hydrodynamic phase transitions' in a radiating spherically symmetric distribution of matter. *Astrophys. J.* 339: 339-353.

Herrera L, Ponce de León J (1985) Anisotropic spheres admitting a one-parameter group of conformal motions. *J. Math. Phys.* 26: 2018-2023.

Herrera L, Ruggeri G, Witten L (1979) Adiabatic contraction of anisotropic spheres in general relativity. *Astrophys. J.* 234: 1094-1099.

Herrera L, Jiménez J, Ruggeri G (1980) Evolution of radiating fluid spheres in general relativity. *Phys. Rev. D* 22: 2305-2316.

Herrera L, Jiménez J, Leal L, Ponce de León J, Esculpi M, Galina V (1984) Anisotropic fluids and conformal motions in general relativity. *J. Math. Phys.* 25: 3274-3278.

Herrera L, Barreto W, Di Prisco A, Santos N (2002) Relativistic gravitational collapse in noncomoving coordinates: The post-quasistatic approximation. *Phys. Rev. D* 65: 104004. 15 pp.

Sachs R (1962a) Gravitational Waves in General Relativity. VIII. Waves in Asymptotically Flat Space-Time. *Proc. Roy. Soc. Lond. A* 270: 103-126.

Sachs R (1962b) Asymptotic Symmetries in Gravitational Theory. *Phys. Rev.* 128: 2851-2864.

Siebel F, Font J, Papadopoulos P (2002) Scalar field induced oscillations of relativistic stars and gravitational collapse. *Phys. Rev. D* 65: 024021. 10pp.

Wald R (1984) *General Relativity*. The University of Chicago Press. Chicago, EEUU. 491 pp.

Winicour J, Tamburino L (1965) Lorentz-Covariant Gravitational Energy-Momentum Linkages. *Phys. Rev. Lett.* 15: 601-605. Errata: 15: 720-720.