

# Modelos teóricos y racionalidad científica. Un enfoque instrumental de la teorización en física<sup>1</sup>

Andrés Rivadulla

## 1. Modelos teóricos y el debate realismo-instrumentalismo

Desde sus orígenes, la física matemática está estrechamente unida a la aplicación de unas herramientas que, con el devenir de los tiempos, resultaron imprescindibles para su espléndido desarrollo. Se trata de los *modelos teóricos*, cuyo uso se ha ampliado a todas las ramas de la física: desde la astrofísica y la cosmología a la microfísica. Por extensión, además, rara es la disciplina científica, incluidas las ciencias sociales, que no hacen uso de modelos teóricos como medios de manejarse con El Mundo.

Aunque los modelos teóricos no son teorías propiamente dichas -a lo más, son hipótesis restringidas a un fenómeno o un dominio limitado de fenómenos-, aplican teoría, y son especialmente útiles en aquellas disciplinas huérfanas de ella. En éstas los modelos teóricos suplen el papel de las teorías ausentes.

El requisito fundamental para la aceptación de un modelo teórico es el *éxito empírico*. Ahora bien, es evidente que la inferencia del éxito a la verdad, la verosimilitud, o la probabilidad de verdad es ilegítima. Rechazo pues de plano que las relaciones de los modelos con el mundo sean de verosimilitud, isomorfismo, o incluso algo más débil como analogía o semejanza.

Sobre la no representatividad de los modelos, un par de referencias a afirmaciones de físicos destacados puede ser de utilidad. Así, por ejemplo, H.T. Flint, en *Wave Mechanics*, London 1951, p. 110, sostiene que: “No debemos esperar que nos será fácil describir pictóricamente mediante modelos las cosas fundamentales de la naturaleza”. Por su parte, W. Heitler, en *Elementary Wave Mechanics*, Oxford: Clarendon Press, 1946, p. 70, asevera que: “Esta imagen del electrón giratorio como una bola que rota sobre sí misma no debe ser tomada literalmente (...) las preguntas sobre cuál sería el radio de tal bola, etc., no tienen ningún significado físico”.

Si bien estas afirmaciones sugieren una metodología instrumentalista de la física, una de cuyas expresiones más claras la habría ofrecido, en pleno siglo XXI, Stephen Hawking (2002, p. 59): “Desde una perspectiva positivista... no podemos determinar lo que es real. Lo único que podemos hacer es averiguar qué modelos matemáticos describen el Universo en que vivimos...”<sup>2</sup>, es obvio que no todos los físicos teóricos contemporáneos mantienen una posición instrumentalista en ciencia. Entre los realistas más destacados, Steven Weinberg (1998, p. 48) mantiene, en una retórica que podría haber rubricado Karl Popper, que: “lo que nos empuja hacia delante en el trabajo de la ciencia es precisamente la idea de que hay ahí fuera verdades por descubrir, verdades que, una vez descubiertas, pasarán a formar parte permanente del conocimiento humano.”

Pero con todo el respeto que me merece Weinberg como físico, y por supuesto también Popper como filósofo, me permito dudar seriamente de que alguna vez, incluidos nuestros días

---

<sup>1</sup> Este trabajo se inscribe en un proyecto de investigación sobre *Modelos teóricos en ciencia*, Ref.: FFI2009-10249, del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

<sup>2</sup> De una forma más rotunda se expresa Hawking en el diario *El País* de fecha 13 de Abril de 2005: “Una teoría es tan sólo un modelo matemático para describir las observaciones, y no tiene derecho a identificarse con la realidad, sea lo que sea lo que esto signifique. Podría ser que dos modelos muy diferentes logran describir las mismas observaciones: ambas teorías serían igualmente válidas, y no se podría decir que una de ellas fuera más real que la otra.”

presentes, la física haya podido afirmar que dispone de una teoría verdadera que es 'parte permanente del conocimiento humano'.

Claro que aquí estoy obligado a precisar en qué sentido disiento de la existencia de 'verdades científicas'. En realidad mi posición es francamente positiva, pues sostengo que la tarea científica por antonomasia es la predictiva, y que la ciencia exitosa es la que es predictivamente eficaz. Así, *si es un hecho que* el Sol desvía la radiación electromagnética casi dos segundos de arco, y *es un hecho que* esta radiación se propaga en el vacío con una velocidad constante  $c$ , y también *es un hecho que* los electrones son portadores de la unidad de carga eléctrica, y *es un hecho que* la Tierra gira alrededor del Sol con un periodo de un año, y *es un hecho que* en condiciones normales de presión y temperatura el agua hierve a  $100^{\circ}$  C, y *es un hecho que* los cuerpos caen sobre la superficie de la Tierra con una aceleración constante  $g$ , y *es un hecho que* ..., y a *estos hechos* los queremos considerar *verdades científicas*, y me parece muy razonable hacerlo, entonces no me cabe la menor duda de que en gran medida el progreso científico se mide, y se seguirá midiendo por el número de *hechos* -si queremos, *verdades*-, por descubrir. Y en este sentido de *verdad científica*, concuerdo con Weinberg, Popper, Kitcher, y en general con los realistas.

Claro que con este planteamiento parece que no he conseguido sino trasladar de lugar el problema filosófico de la verdad de los enunciados observacionales. Un realista interno diría: me parece correcto aceptar la existencia de *verdades científicas* en el sentido del párrafo anterior, ya que verdad y referencia son internos a la teoría. A lo que responderíamos: Bien, pero entonces sólo pueden ser verdaderos los enunciados cuyo contenido son hechos en el sentido indicado; por contra, nada hay que pueda otorgar verdad a la teoría misma, con lo que algo que es ajeno a la verdad, la teoría, otorgaría verdad a enunciados observacionales. El realista interno contestaría: Sí; pero *en condiciones epistémicas ideales*, una teoría *racionalmente aceptable*, es decir una teoría que muestre virtudes epistémicas tales como eficacia instrumental, coherencia, comprensión, simplicidad funcional<sup>3</sup>, etc. habría de ser considerada *verdadera*.

A esto se le podría replicar que no es inmediato que *verdad* equivale a la suma lógica de toda una serie de virtudes epistémicas, que constituyen un conjunto exhaustivo e inclusivo, cuya posesión harían de la teoría una teoría *buena*, y en situaciones ideales, incluso una teoría *verdadera*. También Thomas Kuhn (1977, p.322) en su conferencia de 1973, *Objetividad, juicios de valor y elección de teorías*, había identificado la precisión, consistencia, alcance, simplicidad y fertilidad, como la base compartida de criterios para la elección de teorías. Como sabemos, Kuhn opina, y entiendo que con bastante buen sentido, que, tomados conjuntamente, tales criterios pueden colisionar entre sí. A lo que Putnam respondería: Pero no en condiciones epistémicas ideales.

Ahora bien, en todo caso para cuando la humanidad haya podido adquirir tales destrezas, si lo logra, la Tierra habrá dejado de existir. Eso, si la especie humana no desaparece antes como consecuencia de algún cataclismo geológico o cósmico<sup>4</sup>. Y no queremos aplazar tanto la solución del debate realismo-instrumentalismo de la filosofía actual de la ciencia, ya de por sí más que bimilenario<sup>5</sup>. Queremos aportar una solución.

Para ir concluyendo: la adopción del instrumentalismo respecto de teorías suspende la pregunta por la verdad de éstas. En efecto, cuando avanzamos más allá de los hechos e inquirimos sus causas, nos enfrentamos a un problema sencillamente porque esta pregunta trasciende el nivel empírico y se coloca en el nivel de la teoría. Y, reitero que, por muy exitosa que sea predictivamente una teoría, el paso del éxito empírico a la verdad, la verosimilitud o la probabilidad de verdad de la misma, es lógicamente ilegítimo. Esta es una idea popperiana, pues fue Popper quien la popularizó -haciendo de paso ininteligible su realismo científico-, aunque de hecho Hume y Einstein ya la habían avanzado<sup>6</sup>.

---

<sup>3</sup> Putnam (1981, pp. 133-134)

<sup>4</sup> Cf. Rivadulla (2003, p. 244)

<sup>5</sup> Cfr. Rivadulla (2004, Cap. 0)

<sup>6</sup> Cf. Rivadulla (2004, p. 34 y ss.)

¿Puede ser entonces predictivamente exitosa una teoría, independientemente de la cuestión de su verdad? Indudablemente, sí. Nuestra ciencia occidental, ya desde sus orígenes con Platón, empezó buscando el éxito. Con Aristóteles consideró que su meta era la verdad y la justificación de la verdad<sup>7</sup>. El éxito fue blandido por instrumentalismo y realismo como bandera de sus respectivos posicionamientos epistemológicos. El realista arguye desde entonces, dando un salto lógicamente ilegítimo, que el éxito es garantía de verdad. En esencia en esto consiste el *argumento de Putnam-Boyd del no milagro* a favor del realismo científico. El instrumentalista por contra sostiene que la verdad no es necesaria, y que el éxito empírico es suficiente para hacer ciencia seria. De hecho, sostiene que una teoría exitosa no tiene por qué ser verdadera. Una teoría puede ser exitosa en ciertos dominios, y con ciertas limitaciones. Su sustitución por otra más exitosa no le resta utilidad en aquellos diálogos con la Naturaleza en que era exitosa -no verdadera-. Por eso, muchos *enunciados verdaderos de hechos* de una teoría desplazada siguen siendo verdaderos después. Así, cualesquiera que sean las teorías que sostengamos, nunca va a dejar de ser verdad que la Tierra gira alrededor del Sol, o que los electrones<sup>8</sup> tienen una carga de unos  $10^{-19}$  C, y una masa de unos  $10^{-31}$ kg, etc. El conocimiento de estos hechos y otros similares, conocidos o aún por descubrir, sea que resulten de predicciones de teorías, sea que provengan directamente de forma más o menos sorprendente de nuestro diálogo experimental con la Naturaleza, es el objetivo fundamental de la ciencia. Esto es en lo que consiste el conocimiento del Mundo, que es posible y da sentido a la ciencia. Las teorías nos ayudan a conseguirlo. Aun siendo ajenas a la verdad, la descripción y la explicación.

Que ¿cómo es esto posible? Pues porque están diseñadas para el éxito empírico, que es lo que regula la práctica científica. La sustitución de unas teorías por otras obedece sólo a que unas pierden eficacia predictiva en favor de otras. No porque a partir de un momento determinado *dejen de ser verdaderas, verosímiles o probablemente verdaderas*. El *balance predictivo*<sup>9</sup> es el instrumento para la decisión racional.

Sin embargo, estas cuestiones deben aclararse mejor recurriendo al papel que los *modelos teóricos* juegan en la metodología de la física. Trabajar con modelos teóricos es más cómodo que con teorías, y ofrece resultados menos discutibles y especulativos<sup>10</sup>.

Los modelos teóricos constituyen propuestas hipotéticas tendentes *tanto* a ‘salvar los fenómenos’ *como* a facilitar predicciones empíricamente contrastables acerca de los dominios empíricos con los que están concernidos. Pero no constituyen representaciones verdaderas ni verosímiles, ni probablemente verdaderas, de los mismos. Naturalmente que los modelos se refieren a algo *ahí fuera*. Pero el acceso al mundo está mediado por el propio modelo. Luego la pretensión de que éste lo representa es falaz, ya que el modelo no puede ser al mismo tiempo *juez y parte* en el proceso ‘cognitivo’.

A continuación voy a poner algunos ejemplos de modelos teóricos en física con el objetivo de ver que algunos son más aceptables que otros. Estos modelos satisfacen algunas de las características que Karl Popper (1994) les atribuía<sup>11</sup>. Reflexiones complementarias sobre el papel que los modelos teóricos juegan en la metodología de la física las he desarrollado en Rivadulla (2006a,b y 2007).

## 2. El modelo estelar de *cuerpo negro*

En astrofísica la luz que nos llega de las estrellas es la única fuente observacional a partir de la cual podemos proponer hipótesis acerca tanto de sus atmósferas como de sus interiores. A falta de teorías propiamente dichas, la postulación de modelos teóricos es inevitable. La exigencia científica ineludible es la consistencia de tales modelos con leyes físicas aceptadas -de hecho los modelos estelares serían impensables sin teorías ya aplicadas en otros dominios-, así como su concordancia con datos observacionales disponibles.

<sup>7</sup> Cf. Rivadulla (2004, p. 33 y ss.)

<sup>8</sup> Sobre el descubrimiento de los electrones, Cf. Rivadulla (2003, p.162 y ss.).

<sup>9</sup> Cf. Rivadulla (2004, p. 29, 130, 183)

<sup>10</sup> Interesantes resultados con peso epistemológico se hallan en Rivadulla (2004, cap. V)

<sup>11</sup> Si bien en Rivadulla (2004, pp. 137-138) discrepo también de varias de ellas.

## 2.1. Una aplicación del modelo estelar de *cuerpo negro* al cálculo de la temperatura de la superficie solar

Un cuerpo negro es una fuente ideal de luz, pues absorbe toda la radiación que incide sobre él, pero emite radiación en función de su temperatura solamente. Su radiación es independiente de su constitución material. Hablamos entonces de la *radiación de un cuerpo negro*, cuando el objeto en cuestión se encuentra en equilibrio termodinámico, e. d. a temperatura constante, y en equilibrio radiativo, e. d. emite un flujo constante de radiación. El color de la luz que emite un cuerpo negro es un indicador de su temperatura. Cuanto mayor es la temperatura del cuerpo negro, más azul será la luz que emita. Cuanto menor, más rojo se verá. El hecho de que un cuerpo negro emita radiación no le impide empero seguir absorbiendo toda la radiación que, procedente de otras fuentes, incida sobre él.

La noción de *cuerpo absolutamente negro* procede de Gustav Kirchhoff. Lo afirma Hermann von Helmholtz (1922, p.153), para quien estos cuerpos son objetos:

que no dejan escapar nada de la radiación que incide sobre ellos, sino que lo retienen todo; absorben todos los rayos, sin reflejar ninguno. [...] Cuando los cuerpos negros se calientan y emiten radiación térmica, radian con mucha energía (¡carbón incandescente!); (...) un cuerpo radia tanto más fuertemente cuanto 'más negro' es.

Las estrellas ciertamente no son cuerpos negros. En primer lugar, una estrella no se encuentra en equilibrio termodinámico, pues no está a igual temperatura en todas sus partes<sup>12</sup>. Además las partículas que las constituyen continuamente colisionan entre sí e interactúan con el campo de radiación absorbiendo y emitiendo fotones. Pero aunque las estrellas no sean cuerpos negros genuinos, un ejemplo ilustrativo de la bondad del modelo estelar de cuerpo negro lo ofrece la posibilidad de calcular la temperatura de la superficie solar. *Suponiendo* pues que el Sol es un cuerpo negro, la energía total emitida por él por unidad de superficie y unidad de tiempo viene dada por la *Ley de Stefan-Boltzmann*<sup>13</sup>  $E = \sigma T^4$ , donde  $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  es la *constante de Stefan-Boltzmann*.

La *luminosidad solar* se entiende en astrofísica como la potencia, o energía por unidad de tiempo, emitida por el Sol, y viene dada por  $\ell = 4\pi R^2 \sigma T^4$ , siendo  $R$  el *radio solar*. Pero como las estrellas no son cuerpos negros perfectos, en la fórmula de la luminosidad la temperatura que se considera es la de la superficie de la estrella, que es la *temperatura efectiva*  $T_e$ .

En la superficie de la Tierra, es decir a una distancia  $d=150 \times 10^6$  km de la superficie solar, la *luminosidad solar*  $\ell = 4\pi d^2 e$  es la que correspondería a un punto de la superficie solar correspondiente a un *Sol extendido* con un radio que llegase hasta la Tierra;  $e$  es la *irradiancia solar*, o sea la energía recibida del Sol en la Tierra, por unidad de superficie. Igualando ambas expresiones resulta:  $4\pi R^2 \sigma T_e^4 = 4\pi d^2 e$ .

Disponemos en física de una constante, denominada *constante solar*, que da la medida de la irradiancia solar, cuyo valor es  $e_{\odot} = 1,38 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1,353 \text{ kW m}^{-2}$ . Despejando  $T_e$  obtenemos  $T_{\odot} = 5780 \text{ K}$  como temperatura de la atmósfera del Sol.

## 2.2. Otro ejemplo de la bondad del modelo estelar de cuerpo negro. Espectros estelares.

Asumida su condición de cuerpos negros, las estrellas deben ajustarse a la *Ley del desplazamiento de Wien*:  $\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{cte}$ , la cual establece<sup>14</sup> que “a medida que la temperatura del cuerpo aumenta, el máximo de su distribución de energía se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas”. Así, cuanto mayor es la temperatura de una estrella, mayor es su tendencia a

<sup>12</sup> En la fotosfera solar la temperatura varía entre 5650 y 5890 K en una distancia de 28 km (Cf. Ostlie & Carroll 1996, p. 263, Ejemplo 9.1)

<sup>13</sup> Cf. Rivadulla (2002, §1)

<sup>14</sup> Cf. Rivadulla (2002, pp. 46-47)

emitir en el ultravioleta, cuanto más fría es, mayor su tendencia a emitir en el rojo o en el infrarrojo. Nuestro Sol emite en el amarillo.

La luz que emite un elemento químico a una temperatura apropiada, descompuesta en sus colores constituyentes cuando la dispersamos a través de un prisma se denomina su *espectro*. Sólidos, líquidos incandescentes y gases densos calientes, emiten *espectros continuos*, mientras que gases calientes difusos emiten *líneas brillantes*. Respecto al análisis espectral Helmholtz, *op. cit.*, p. 167, asevera:

Los vapores incandescentes emiten luz que muestra, descompuesta espectralmente, fuertes máximos de intensidad en las inmediaciones de determinados colores individuales puros, mientras que son nulos para todos los demás colores; producen un espectro de líneas.

Las estrellas también emiten su propio espectro. El más característico es el solar. El espectro de las estrellas está constituido por un continuo, análogo al de un cuerpo negro en laboratorio a la misma temperatura que la estrella. Sobre el continuo se superponen líneas brillantes de emisión, o líneas oscuras de absorción, que son las que emiten los elementos químicos de que se compone la atmósfera de la estrella. Los espectros de emisión se producen cuando la luz incide directamente sobre el prisma, mientras que los de absorción tienen lugar cuando la radiación pasa a través de un medio absorbente que suprime las líneas del espectro de emisión. Así, afirma Helmholtz,

Esto se muestra cuando la luz fuerte que sale de un cuerpo caliente, el Sol por ejemplo, se hace pasar por el vapor; entonces, como consecuencia de la absorción máxima, aparecen líneas oscuras en exactamente las mismas posiciones del espectro en las que se sitúan las líneas claras en el espectro de emisión.

Comparando los espectros de las estrellas con los espectros de los elementos conocidos obtenidos en laboratorio, podemos determinar su composición. El espectro de una estrella es una característica distintiva suya. Los espectros estelares, corridos hacia el violeta, o hacia el rojo, según la mayor o menor temperatura de la estrella, se comportan como se espera que lo hagan según la *ley del desplazamiento de Wien*, y ello indica que el modelo de *cuerpo negro* es aceptablemente bueno para el estudio de la radiación de las estrellas.

### 3. Grandeza y servidumbre del modelo gravitacional Newtoniano

Éxitos y fracasos del modelo gravitacional Newtoniano los he expuesto en Rivadulla (2004, Cap. V, §2, así como en 2006a, pp. 79-83 y en 2006b, §3.1). Seguidamente voy a indicar, a modo de ilustración, otros casos que reflejan la cara y la cruz de su aplicación en física teórica. Los éxitos del modelo gravitacional newtoniano no deben hacernos echar las campanas al vuelo acerca de su aplicabilidad universal.

#### 3.1. Aplicación de la *tercera ley de Kepler-Newton* para el cálculo de la masa solar

Supongamos un sistema de dos cuerpos de masas  $M_S$  y  $m$ , éste en órbita circular alrededor del otro a distancia  $r$ , entre los que rige un equilibrio entre fuerzas

gravitatorias atractivas  $F = G_N \frac{M_S m}{r^2}$  y centrífugas  $F = m \times a_n = m \times \omega^2 r = m \times \left(\frac{2\pi}{P}\right)^2 r$ .

Expresamos este equilibrio como:  $G_N \frac{M_S}{r^2} = \frac{4\pi^2}{P^2} r$ , del que resulta la *tercera ley de*

*Kepler*:  $P^2 = \left(\frac{4\pi^2}{G_N M_S}\right) r^3$ , la cual, aplicada al Sol, permite determinar su masa:

$$M_S = \frac{C^3}{2\pi G_N P^2} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg},$$

conocida la circunferencia orbital  $C$  de un planeta cualquiera y su periodo orbital  $P$ .

### 3.2. Una aplicación del modelo newtoniano a estrellas colapsadas

Si un pulsar rota con una frecuencia de varias veces por segundo ¿Cómo es que no se desintegra por efecto de su propia rotación? Conjeturamos<sup>15</sup> a modo de explicación la idea de que su propia

gravedad debe superar la fuerza centrífuga, o sea:  $\frac{G_N M}{R^2} \geq \frac{v^2}{R}$ , donde la velocidad rotacional

ecuatorial, en términos del periodo de rotación  $P$ , es:  $v = \frac{2\pi R}{P}$ . Sustituyendo este valor en

$v^2 \leq \frac{G_N M}{R}$ , obtenemos que  $R^3 \leq \frac{G_N M P^2}{4\pi^2}$ . Si supiéramos que este pulsar tiene un radio de

100 km, entonces su densidad, para 1 masa solar sería:  $\rho = \frac{2 \times 10^{33}}{4 \times 10^{21}} = 10^{12} \text{ g cm}^{-3}$ , que es una

densidad próxima a las densidades nucleares.

### 3.3. La explicación imposible de la energía de las estrellas por el modelo de colapso gravitacional de Kelvin-Helmholtz

¿Cuál es la fuente de la energía de las estrellas? Ésta es la pregunta a la que se enfrenta Arthur Eddington (1930, 290 y ss.). Aunque su opinión en esos años era que la fuente de la energía estelar es subatómica, le parece conveniente analizar otras propuestas, entre ellas la *teoría de la contracción* de Helmholtz y Kelvin, la cual supone que el suministro de energía se mantiene por la conversión de energía gravitacional en calor debido a la contracción gradual de la estrella.

En una conferencia pronunciada en Königsberg el 7 de Febrero de 1854, con ocasión del 50 aniversario de la muerte de Immanuel Kant, Hermann von Helmholtz planteó por vez primera la idea de la generación de la energía solar por colapso gravitacional. Doce años después Lord Kelvin retoma esta idea en "On the Age of the Sun's Heat", *Macmillan's Magazine*, March 1862, reimpreso en Kelvin (1867, Apéndice E).

En la Parte III de su artículo mencionado, Lord Kelvin (*op.cit.*, pp. 493-494. Mis cursivas, A. R.) se adhiere a la *teoría meteórica* de Helmholtz. Esta teoría

consists in supposing the sun and his heat to have originated in a coalition of smaller bodies, falling together by mutual gravitation, and generating, as they must do according to the great law demonstrated by Joule, an exact equivalent of heat for the motion lost in collision.

*That some form of the meteoric theory is certainly the true and complete explanation of solar heat can scarcely be doubted, ...*

[...]

*It seems, therefore, on the whole most probable than the sun has not illuminated the earth for 100,000,000 years, and almost certain that he has not done so for 500,000,000 years. As for the future, we may say, with equal certainty, that inhabitants of the earth cannot continue to enjoy the light and heat essential to their life, for many million years longer, unless sources now unknown to us are prepared in the great storehouse of creation.*

Veamos la viabilidad de esta hipótesis. Si las estrellas lucen debido a la conversión de su energía potencial gravitacional  $dV_g = -G_N \frac{M dm}{r}$  en calor, entonces como la masa  $dm$  de un

<sup>15</sup> Cf. Böhm-Vitense (1989, § 17.1.5.)

capa de espesor  $dr$  de la estrella es<sup>16</sup>  $dm = 4\pi r^2 \rho dr$ , donde  $\rho$  es la densidad de masa de la capa y  $4\pi r^2 dr$  su volumen; sustituyendo tenemos que  $dV_g = -4\pi G_N M \rho r dr$ .

Integrando para todas las capas, asumiendo ahora una densidad constante, e igual a su valor medio, o sea:  $\rho \approx \bar{\rho}$ , y sustituyendo el valor de  $M$  en función de la densidad, resulta que la *energía potencial gravitacional total* de la estrella vale:

$$V_g = -4\pi G_N \frac{4}{3} \pi \bar{\rho}^2 \int_0^R r^4 dr \approx -\frac{16\pi^2}{15} G_N \bar{\rho}^2 R^5.$$

Tomando finalmente en esta expresión el valor cuadrático de la densidad media, tenemos que  $V_g \approx -\frac{3}{5} G_N \frac{M^2}{R}$ . Basta aplicar ahora el *teorema del virial*, según el cual la energía total de un sistema en equilibrio es la mitad de su energía potencial, para concluir que la *energía mecánica total de una estrella* es  $E \approx -\frac{3}{10} G_N \frac{M^2}{R}$ .

En el caso de nuestro Sol, la energía gravitacional liberada durante su ‘colapso gravitacional’ hasta la fecha sería  $E_g \approx 1,1 \times 10^{48}$  erg. Suponiendo finalmente una *luminosidad* constante del Sol durante toda su vida, y teniendo en cuenta que *luminosidad* es *potencia*, o sea energía por unidad de tiempo, la edad actual del Sol sería  $t = \frac{E_g}{\ell} \approx 10^7$  años. Edad ridículamente corta, como aduce Eddington (*op. cit.*, p.290), con toda razón:

Todos los argumentos biológicos, geológicos, físicos y astronómicos llevan a la conclusión de que esta edad es demasiado pequeña y que la escala temporal dada por la hipótesis de la contracción debe ser ampliada.

#### 4. Conclusión

A la vista del fracaso del modelo newtoniano de colapso gravitacional de Kelvin-Helmholtz se podría replicar, con toda razón, que lo que aquí tenemos es simplemente una muestra de que no toda hipótesis física que sea consistente con leyes aceptadas necesariamente concuerda con datos observacionales. Con lo que nuestra actitud debería ser rechazarla sin más como empíricamente inaceptable. Se podría incluso argüir que el modelo celeste newtoniano no tiene por qué ser aplicable a todas y cada una de las situaciones que la Naturaleza nos presenta.

Por la cosa es bastante más grave que el mero decir: la responsabilidad del fracaso reside en nosotros, que hemos excedido el campo de aplicación de la mecánica newtoniana. Pues el modelo celeste newtoniano fracasa también en dominios *en los que no debería hacerlo, si fuera verdadero*. En efecto, durante más de doscientos años el modelo newtoniano se mostró empíricamente exitoso hasta que, entre finales del XIX y principios del XX, la mecánica estadística, la mecánica cuántica, y la nueva mecánica relativista, pusieron de manifiesto su debilidad para enfrentarse a tareas y dominios nuevos. Así, no fue capaz de afrontar razonablemente viejos retos reinterpretados desde la teoría general de la relatividad: el avance del perihelio de Mercurio, la desviación de la luz por el Sol, el desplazamiento gravitacional hacia el rojo, etc.<sup>17</sup> Como además el modelo del Mundo propuesto por la teoría de la relatividad es incompatible con él, resulta obligado concluir que el newtoniano no es adecuado a los fenómenos gravitacionales, y por tanto ridículo pretender que representa la realidad ni siquiera de forma aproximada.

<sup>16</sup> Cf. Ostlie & Carroll, *op. cit.*, p. 329-330.

<sup>17</sup> Cf. Rivadulla (2003, p. 219 y ss.), y (2004, pp. 100-102)

Si además nos adentramos en el dominio de la microfísica<sup>18</sup>, resulta más que evidente que los modelos teóricos de la física no son más que simples herramientas conceptuales *provisionales* para habérmolas ‘científicamente’ con la Naturaleza.

### Fuentes

- BÖHM-VITENSE, E. (1989), *Introduction to Stellar Astrophysics*. Vol. I: *Basic Stellar Observations and Data*, Cambridge University Press, Cambridge
- EDDINGTON, A. S. (1926), *The Internal Constitution of the Stars*, Cambridge, University Press
- HAWKING, S. (2002), *El Universo en una cáscara de nuez*, Ed. Crítica, Planeta, Barcelona
- HELMHOLTZ, H. (1922), *Vorlesungen über Theoretische Physik*, Band VI: *Vorlesungen über Theorie der Wärme*, Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig. Edición de Franz Richarz, a partir de notas del maestro de 1890, notas taquigráficas de 1893
- KUHN, T. S. (1977), *The Essential Tension*, University of Chicago Press, Chicago. Versión española, *La tensión esencial*, FCE, México 1993
- KELVIN, LORD (1867), *Treatise on Natural Philosophy*, Cambridge, University Press, 1867, 1903, 2 vols. Escrito conjuntamente con Peter Guthrie Tait.
- OSTLIE, D. A. & B. W. CARROLL, *An Introduction to Modern Stellar Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, MA
- POPPER, K. R. (1994): “Models, Instruments and Truth”. En K. Popper, *The Myth of the Framework. In defence of science and rationality*, Routledge, London. Versión española: *El mito del marco común*, Paidós, Barcelona, 1997
- PUTNAM, H. (1981), *Reason, Truth and History*, Cambridge Univ. Press, Cambridge. Versión española, *Razón, verdad e historia*, Ed. Tecnos, Madrid 1988
- RIVADULLA, A. (2002): “La solución revolucionaria de Planck del problema de la radiación del cuerpo negro”. En C. Mataix y A. Rivadulla (eds.), *Física Cuántica y Realidad. Quantum Physics and Reality*, Editorial Complutense, Madrid 2002
- RIVADULLA, A. (2003), *Revoluciones en Física*. Editorial Trotta, Madrid
- RIVADULLA, A. (2004), *Éxito, Razón y Cambio en Física. Un enfoque instrumental en teoría de la ciencia*. Editorial Trotta, Madrid
- RIVADULLA, A. (2006a): “The Role of Theoretical Models in the Methodology of Physics”. En L. Magnani (ed.), *Model-Based Reasoning in Science and Engineering*, King’s College Publications, London.
- RIVADULLA, A. (2006b): “Theoretical Models and Theories in Physics. A Rejoinder to Karl Popper’s Picture of Science”. En I. Jarvie, K. Milford and D. Miller (eds.), *Karl Popper: A Centenary Assessment. Volume III: Science*, Ashgate, London
- RIVADULLA, A. (2007): “Restricciones sin Refutaciones de Dominios de Teorías Físicas. Elementos para el debate realismo-instrumentalismo”. *Eidos* nº 6, 2007, 10-25.
- WEINBERG, S. (1998): “The Revolution That Didn’t Happen”, *The New York Review of Books*, Vol. XLV, Number 5.

---

<sup>18</sup> Cf. Rivadulla (2004, cap. V, §§ 3 y 4)