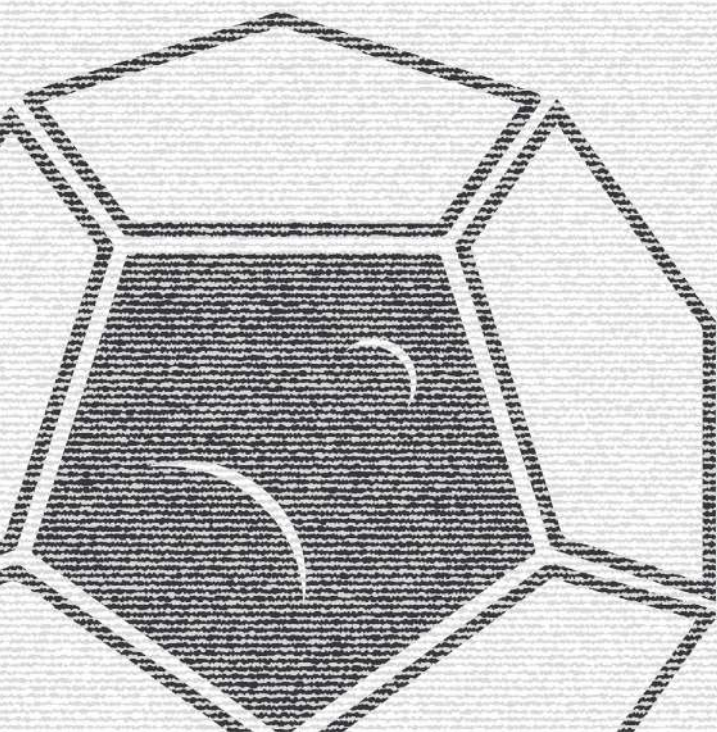


Maximiliano Bozzoli
Luis Salvatico
David Merlo
(Eds.)

Epistemología e Historia de la Astronomía

Volumen I



Epistemología e Historia de la Astronomía

Volumen I

Maximiliano Bozzoli

Luis Salvatico

David Merlo

(Eds.)

**Colecciones
del CIFYH**



Epistemología e historia de la Astronomía / Maximiliano Bozzoli ... [et al.]; compilación de Luis Salvatico; David C. Merlo. - 1a ed. - Córdoba : Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Filosofía y Humanidades, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-33-1721-1

1. Astronomía. 2. Historia. 3. Epistemología. I. Bozzoli, Maximiliano. II. Salvatico, Luis, comp. III. Merlo, David C., comp.
CDD 520.3

Publicado por

Área de Publicaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades - UNC

Córdoba - Argentina

1º Edición


Área de
Publicaciones

Diseño de portadas: Manuel Coll y María Bella

Diagramación: María Bella

Imagen portada: “JEHA (*Jornadas de Epistemología e Historia de la Astronomía*)” (2021), de Maximiliano Bozzoli

2023



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.



Entre códigos y conocimientos

Xavier Huvelle*

Resumen

Este trabajo discute la relación entre el código de una simulación y su consideración como conocimiento y de los peligros que resultan en verlos como tales sin cuidados particulares. Las consecuencias pueden ser dramáticas acerca de la validez de las investigaciones realizadas. Para ello analizamos dos casos observacionales, el famoso objeto *Oumuamua* y de un estudio realizado por Namouni y Morais acerca del posible origen interestelar de objetos transneptunianos con orbitas retrogradas. Concluimos que si bien podemos lograr que ciertos conocimientos pueden ser codificados y formar una relación código-conocimiento, no todos pueden actualmente aspirar a este estatuto.

Palabras clave: *filosofía de la ciencia, epistemología, programación, simulaciones computacionales, astronomía.*

Abstract

This paper discusses the relationship between the code of a simulation and its consideration as knowledge and the dangers that result in seeing it as such without particular care. The consequences can be dramatic regarding the validity of the research carried out. For this, we analyze two cases of experiments, the famous Oumuamua object, and a study carried out by Namouni and Morais about the possible interstellar origin of trans-Neptunian objects with retrograde orbits. We conclude that although we can achieve that certain knowledge can be codified and form a code-knowledge relationship, not every codes can currently aspire to this status.

Keywords: *philosophy of science, epistemology, programming, computer simulation, astronomy.*

* Centro de Investigaciones de la Facultad de Filosofía y Humanidades (UNC) – (CONICET).

Introducción

Al construir las primeras computadoras, algunas teorías como el computacionalismo emergieron, en la que se emparentaba la cognición humana con los programas usados para controlar las computadoras. Von Neumann (Von Neumann y Goldstine, 1947), Simon y Newell (1971) son algunos de los defensores de la equivalencia¹ entre conocimientos y programas. La idea de tener a disposición una computadora para mimetizar un cerebro humano, podría revelarnos estos principios y mecanismos que nos escapaban al estudiar un ser humano. El conocimiento que uno tenía podía en principio ser observado en el flujo informacional dentro de una máquina y en la que los principios que guían el proceso de decisión y de resolución de problemas se encontraban claramente expresados en el código del programa computacional. Conocimiento y código son, en este programa de investigación, sinónimos y en el que simular se entiende como un estadio experimental para probar estrategias con el afán de refinarlas para alcanzar una solución deseada.

En astronomía la tesis de que el código es conocimiento parece haber revivido desde otra perspectiva con objetos y efectos distintos. Esta vez no se busca estudiar al ser humano en sí, sino al universo, su formación y evolución, su desenvolvimiento, sus objetos y causas y su devenir. Uno de los problemas mayores que enfrenta esa disciplina es todo lo relativo a la observación, sus modos e interpretaciones. Los datos escasean o abundan, dependen de lapsos observacionales cortos o demasiados grandes, son accesibles y luego inaccesibles o directamente no pueden ser observados y dependen puramente de teorías. Las simulaciones computacionales emergen como herramientas ideales para poder sustituir o limitar las faltas y los excesos. Sin embargo, no se debe olvidar que el mayor uso de simulaciones computacionales tiene que ver con una necesidad de computar y proveer datos numéricos sobre los objetos que deseamos observar. Algunos de los primeros en hacer tal uso fueron Swarzschild y Hoyle (Hoyle y Swarzschild, 1955) y Aarseth (1985). Swarzschild y Hoyle necesitaron usar

1 El computacionalismo defiende la idea que los procesos mentales en un ser humano y en una máquina son equivalentes o hasta idénticos. Se consideró en los primeros días de la inteligencia artificial que la computadora podría ser un instrumento que nos revelarían los secretos del funcionamiento del cerebro humano.

computadoras para poder calcular las estructuras estelares de las ramas de las gigantes rojas en el diagrama H-R (Hertzprung-Russell). Mientras que Aarseth se ha dedicado en estudiar la evolución estelar a través del código de *N-cuerpos*. Una de las diferencias más notables entre ambas perspectivas es que en el caso de Swarzschild y Hoyle las simulaciones eran usadas para apoyar las hipótesis en base a un modelo, en cambio para Aarseth la simulación es el modelo, es el objeto de estudio y el proveedor de datos. En Aarseth, la simulación y en particular el código es visto entonces como conocimiento que posee una cierta independencia con posibles hipótesis y no como una ayuda para sostener una hipótesis. Este trabajo explora esta perspectiva, sus peligros y beneficios, así como su aplicación en dos casos interesantes; a) el objeto conocido como Oumuamua y b) el de simulación de objetos de origen interestelares que residen en la órbita de Júpiter. Concluimos que existe un uso importante de la relación código-conocimiento que, si bien es necesaria, se encuentra creando problemas serios en el ámbito de la astronomía y de la astrofísica.

Discusión

Aarseth desarrolló uno de los códigos más importantes en simulación computacional para estudiar la dinámica de los *N-cuerpos*². Los *N-cuerpos* fueron uno de los mayores problemas de la astronomía en los tiempos de Newton y en la que se buscaba determinar los movimientos individuales de un conjunto de objetos astronómicos que interactúan entre ellos por efectos de la gravedad. En un principio estos objetos eran los planetas del sistema solar pero luego fue extendido a la dinámica de los sistemas o cúmulos globulares de estrellas. Este problema es considerado resuelto en un modelo Newtoniano y el código desarrollado por Aarseth suele ser reusado o incorporado en otras simulaciones que requieren calcular esta dinámica. Aarseth fue un precursor en el ámbito, por ser uno de los primeros en dejar a disposición de la comunidad el código abierto del programa. Esto facilitó su difusión y extendió su presencia en otros estu-

2 El problema de los *N-cuerpos* es un modelo matemático propuesto por Newton para modelar el comportamiento de nuestro sistema solar y se conforma de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales que son fácilmente expresables pero que resultan complejas en resolver. Este problema sigue siendo un tema importante de investigación en astronomía.

dios. Heng (2014) ofrece otro ejemplo más de Stone (Stone et al. 1992) y de Teyssier³ (Teyssier y Commerçon, 2019) para resolver las ecuaciones de fluidos magnetizados que fueron incorporados en una gran cantidad de estudios dedicados a problemas varios en astrofísica. La disponibilidad de esos códigos al público y a los investigadores les dio relevancia porque fueron incorporados en los repertorios y programas de otros investigadores. Estos códigos no solamente se consolidaron por haber sido extensamente empleados, sino que también fueron mejorando gracias a la participación, modificaciones y mejoras de una amplia comunidad. Esta práctica trae muchas ventajas ya que permite no solo mejorar la calidad y controlar el código, sino que incrementa su implementación en distintas simulaciones dándole una mayor confiabilidad. La confianza otorgada a dichos códigos es tal que, desde el sentido común filosófico, podrían considerárseles como auténticos generadores de conocimientos, ya que permiten modelar con un cierto grado de precisión, un ámbito de fenómenos específicos. Esta creencia epistémica se consolida con las dificultades que surgen al intentar reproducir la simulación, tanto porque el código en muchas ocasiones no es divulgado al público o porque resulta demasiado complejo como para poder reproducirlo correctamente sin necesitar años de investigaciones. Al no poder ser controlado por pares uno depende entonces de la reputación de los modelos, métodos y de los investigadores que participaron en el estudio.

Los problemas se hacen más evidentes cuándo la simulación resulta tan compleja, o si depende de muchos parámetros libres⁴, si es vista como una caja negra o que no puede ser “rota” o falseada. Esto es, que ya no sepamos cómo falsearla o si ofrecerán siempre los datos que deseamos obtener. Oberkampff y Roy (2010, pp. 481-483) sin embargo, son un poco más cautos al respecto, ya que falseando los datos no nos da suficientes indicios acerca de si la simulación es o no válida. Si la simulación

3 Heng no da referencias a algún trabajo en particular. Lo más probable es que se refiere al trabajo de Stone de 1992. En relación a Teyssier, nos pareció que el trabajo escrito con Commerçon muestra un buen recuento de la evolución del código para simulaciones en el ámbito de formación estelar y de dinámica de los fluidos.

4 Son parámetros que deben ser expresados mediante aproximaciones por falta de conocimiento, de capacidad computacional o de información para poder modelar ciertos fenómenos.

tiene algunos prerequisites en relación a un tipo de precisión (*accuracy*) podemos siempre falsearla agregando los datos suficientes para hacerlo. Aunque Oberkampf y Roy se refieren en particular al testeo de hipótesis estadística, en realidad se lo puede ampliar a tipos de errores en lógica y existen dos: 1) riesgo del constructor del modelo y 2) riesgo del usuario del modelo. El riesgo del constructor es el error de rechazar la validez del modelo cuando este es efectivamente válido y puede ser causado tanto desde una perspectiva computacional⁵ que experimental⁶. Mientras que el riesgo del usuario es aceptar la validez del modelo cuando en concreto es inválido. El riesgo del usuario es el más peligroso de los dos tipos, ya que si tenemos un error numérico producido por no haber sido suficientemente preciso en la colocación de una “malla” (*mesh*) los resultados computacionales concordarían con los experimentales que conduciría a una comparación es engañosa. Esto es, crea una compensación o cancela errores en la comparación. Para Oberkampf y Roy estas compensaciones son muy comunes y si existen suficiente evidencia experimental para validar el modelo entonces hay poco interés en cuestionar su validez.

A pesar de estos riesgos y problemas existe, según Heng (2014), una tendencia en tener siempre simulaciones “más grandes, mejores y más rápidas”. Springel (Springel et al., 2005) y su proyecto de simulación del milenio (*The Milenium Simulation Project*) o *Illustris* (Pillepich et al., 2018) resulta ser un gran ejemplo de este tipo de tendencia. Es obviamente no el único, los proyectos *EAGLE*, *BlueTides* y *MassiveBlack II* son algunos otros de este tipo. Algunos de estos proyectos fracasaron de manera estrepitosa mientras que otros son usados como laboratorio experimental. Uno de los fracasos más notables fue notificado a partir de un experimento llamado “experimento Aquila” conducido en 2012 por Scannapieco (Scannapieco et al., 2012) en el que se pidió a varios investigadores simular una galaxia a partir del código que cada uno desarrolló. El resultado fue que todos los resultados no solo

5 Una grilla o malla (*mesh*) puede no tener una convergencia adecuada y crea un error numérico, lo que obliga al modelador a modificar su modelo, aunque es correcto.

6 Es un problema importante ya que se suele considerar que los datos experimentales son correctos y que la falla proviene de la parte computacional. Esto puede conducir en los peores de los casos a recalibrar el modelo matemático, pero en realidad son los datos equivocados. Esto conlleva a que todas las computaciones futuras serán afectadas por estos datos equivocados.

eran distintos, sino que no se adecuaban con las expectativas teóricas o las restricciones observacionales. Este experimento fue lapidario en relación a las expectativas esperadas en tener a disposición simulaciones adecuadas para la tarea científica. A pesar de esos traspiés, en la actualidad se ha mejorado mucho el rendimiento de ese tipo de simulaciones gracias a un mejor entendimiento de las supernovas y los agujeros negros. Lo que todavía no se puede es determinar si se trata de algún riesgo de usuario (como los mencionados por Oberkampff y Roy), o bien, si hay algún tipo de exceso en el uso de los parámetros libres. En ambos casos, ello nos conducirá a una eventual situación capciosa. Hay que precisar, sin embargo, que la estrategia más común hoy en día en simulación computacional en astronomía es hacer uso de modelos bien específicos que se relacionan jerárquicamente uno con otro. Esta estrategia muy usada en climatología (Heng, 2014) permite que varios modelos con grados de complejidad distintos pueden dar lugar a una comprensión de los fenómenos en etapas y así aislar ciertos efectos físicos. Afortunadamente algunos fenómenos, nos dice Heng, como la cuantificación de la absorción de la luz por un átomo de sodio ya no requiere configurar algún parámetro libre. De esta manera, se eliminan ciertos riesgos de entrada de datos falsos, no obstante se puede lograr un código que expresa adecuadamente a dicho fenómeno. La gran pregunta es: ¿este código es conocimiento? No es una respuesta fácil de obtener. Claramente podemos decir que en el caso de tener un modelo que reproduce el fenómeno de cómo la cuantificación de la absorción de la luz ocurre en un átomo de sodio, el código usado puede representar conocimiento. Pero si aceptamos esta premisa debemos estar atento a que no todo código es conocimiento y que en ciertos casos puede traer problemas. Para ejemplificarlo analizaremos rápidamente dos casos.

Casos

El primer caso que abordamos es un ejemplo interesante y actual de un objeto no solamente atípico, sino que crea muchas discusiones para clasificarlo en varios de los modelos actuales. *Oumuamua* es un objeto del medio interestelar con una forma atípica en forma de “cigarro” o disco (Meech et al., 2017), con una velocidad y desviación de una órbita de Kepler complicada de determinar (Micheli et al., 2018; Zhang y Lin 2020), posee una emisión térmica baja (Trilling et al., 2018) y ausencia de una

cola de cometa (Meech et al., 2017; Knight et al., 2017). Por estas razones se ha clasificado a dicho objeto como un asteroide (Meech et al., 2017), un cometa (Seligman et al., 2019), un inusual planeta menor (Zwart et al., 2019) o hasta una nave alienígena (Loeb y Bialy, 2018). En cada uno de los tratamientos realizados se ha intentado clasificarlo según los datos primero observables y luego simulados. Dentro de lo observable pudo notarse que dicho objeto posee un color rojizo, el cual concuerda con lo observado en cometas y asteroides ricos en componentes orgánicos, con una forma muy alargada en comparación a su ancho. El equipo que descubrió el objeto (Meech et al., 2017) pudo determinar por otro lado que su trayectoria tenía una excentricidad hiperbólica de 1.1956 ± 0.0006 confirmando que no era parte del sistema solar. Es el primer objeto registrado que proviene del medio interestelar. Su observación permitió una nueva norma para clasificar los objetos estelares de esta clase: “1I”⁷ o “1I/2017U1”. Este formato usa el sistema otorgado a los cometas. Tal decisión fue, aparentemente tomada porque se supone que los objetos interestelares sean más de tipo cometas que asteroides. Sin embargo, la ausencia de una cola de cometa y su forma irregular, así como su color ha fortalecido la tesis de que sea un asteroide, algunos hasta propusieron que la cantidad de asteroides de ese tipo son mayores que las cometas (Portegies Zwart et al., 2019). Lo más extraño no resultó solamente su forma, sino que además se pudo observar una aceleración no gravitacional del objeto y una desviación de una órbita de Kepler (ver fig. 1) no esperable. La aceleración no gravitacional fue interpretada por Loeb y Bialy (2018), Loeb (2021) como un signo de que se tratara de un objeto artificial. Sin embargo, esta idea fue rebatida por (Katz, 2021) por ser improbable y altamente especulativa (en particular por ser altamente ineficiente). Recientemente, Zhang y Lin (2020) propusieron que *Oumuamua* no era un asteroide sino un cometa y que su aceleración puede explicarse a través de un proceso de “fragmentación de marea” (*Tidal fragmentation*). Esta tesis sostiene que el objeto dispone en su seno de agua o hielo que al acercarse al sol se liberan gases que produjeron tanto la aceleración como la desviación. Esta tesis se apoya en una simulación computacional basada en el código *PKDGRAV N-cuerpos*. Dicho código usado para la simulación fue aparentemente verificado previamente a partir de su validación adjudicada por su presencia en artículos previos y cuyo código puede ser

⁷ Ver <https://minorplanetcenter.net//mpec/K17/K17V17.html>

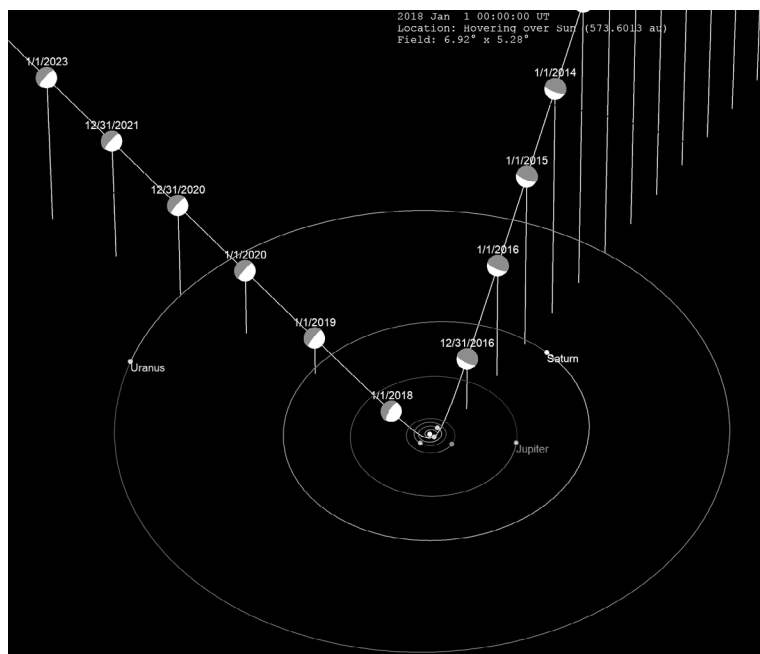


Figura 1. Desviación de órbita de Kepler de *Oumuamua*.

Wang (2018)

Podemos notar que el desarrollo de la observación y de la explicación del objeto se fue trasladando al ámbito de la simulación computacional en el que para justificar el comportamiento de *Oumuamua* se apela a propiedades exóticas como la fragmentación de marea. No podemos decir si la propuesta de Zhang y Lin es correcta o no y si su plausibilidad sigue en discusión con otras propuestas que afirman de que no se trata de un cometa (Wilhelm y Dwivedi, 2020). Podemos en cambio afirmar que la validación de su tesis se encuentra frente a ciertas dificultades dado que no podemos tener fácilmente acceso al código usado por la simulación y de la que depende gran parte su trabajo. El código resulta relevante no solo por una cuestión de verificación del experimento o de cuales fueron los parámetros libres usados. En ciertas ocasiones aparecen informaciones cruciales para el experimento como por ejemplo citas enteras (Roundtree, 2010) de las líneas de códigos usadas en otras simulaciones.

Este re-uso del código, que hemos visto con Heng (2014), conforman un conocimiento que se encuentra validado pragmáticamente por una parte de la comunidad. Al considerar el código como auténticos generadores de conocimientos, también significa que las mejoras o modificaciones del código constituyen un *corpus* del conocimiento acumulado y generado por el investigador y una investigación particular. Para decirlo en otras palabras, el código es visto como la investigación de un científico que se va incrementado o mejorando con el paso del tiempo y por ende son relevantes para una reflexión desde las prácticas científicas. Una de las razones de este comportamiento son las presiones académicas en la que algunos investigadores se ven confrontados, tanto por las presiones para publicar o para obtener títulos académicos de postgrado entre otros. Por otro lado, la retórica usada en la conformación del código (Roundtree, 2010) es importante para la programación de la simulación ya que puede afectar la lectura e interpretación de los resultados y los descubrimientos obtenidos a partir de las simulaciones. Reutilizar código que ha sido validado por la comunidad o usar directamente código como *Gadget 3*⁸ (Springel, 2005 y Springel et al, 2005) ofrece ventajas en la validación del código, pero no necesariamente ofrece seguridad al respecto, más si nos encontramos frente a un objeto atípico que desestabiliza al modelo.

Una de las grandes cuestiones que surge en este caso es ¿cómo podemos confiar en una simulación basada en modelos pre-existentes para explicar un objeto atípico que rompe con las expectativas? Una de las consecuencias es que nos encontramos a merced del riesgo del usuario en el que asumimos que los modelos usados para la simulación son los válidos para poder tratar dicho objeto. Esto no necesariamente significa que los modelos estén incorrectos, sino que son equivocados para analizar al objeto. Es peligroso para la hipótesis sostenida en la simulación intentar hacer compensaciones en el modelo para alcanzar los resultados esperados. Pero, por otro lado, es sano para el ámbito con el fin de consolidar los modelos en caso de que permiten ofrecer una buena explicación. Zhang y Lin se encuentran en ese límite en el que algunos modelos pueden ser afianzados por su éxito en explicar lo novedoso o tener que replantearse. Todavía no podemos afirmar cuál de la dirección tomaría este proceso para ese caso.

8 *Gadget3* es un código muy usado en astronomía de acceso abierto y colaborativo lo que permite una gran ventaja a la hora de validar simulaciones.

El segundo caso se basa en los estudios realizados por Namouni y Morais (2018, 2020) sobre el origen interestelar de algunos objetos que circulan en una órbita retrógrada con Júpiter y de objetos orbitando entre Júpiter, Saturno y los Centauros. Desde la aparición de *Oumuamua* y luego de otro objeto interestelar denominado *2I/Borisov*, se ha iniciado una búsqueda intensiva de otros de estos objetos interestelares. Tan intensiva que tenemos claros abusos del uso de simulaciones computacionales para tratar de validar erróneamente ciertas hipótesis. Entre los objetos observados por Namouni y Morais tenemos entre otros a los objetos (514107) 2015 BZ509, 2008 KV42 y (471325) 2011 KT19 que según los autores son de origen interestelar. Para llegar a esta conclusión, procedieron a simular los objetos observados alrededor de un millón de veces con elementos orbitales que reproducen la incerteza de los objetos observados de forma tradicional. Todos esos clones fueron regresados en el tiempo hasta 4.5 Ga⁹ que es la edad estimada de la formación del sistema solar en la que descubrieron que la gran mayoría de estos clones no sobrevivieron. Solamente un clon de (514107) 2015 BZ509 logró preservar sus características orbitales iniciales durante esos 4.5 Ga simulados y del 15% de los clones de 2008 KV42 y (471325) 2011 KT19. Para Namouni y Morais este resultado muestra que los objetos observados telescópicamente deben haber seguido las trayectorias que les permitieron “sobrevivir” aunque hubieran sido la excepción en todos los posibles resultados dinámicos simulados. Estos objetos simulados que sobrevivieron se encuentran en su estado inicial hace 4.5Ga en una órbita altamente inclinada respecto de los planetas (en el que las inclinaciones de los planetas deberían ser chicas) y por ende deben tener un origen interestelar fuera de nuestro sistema solar. Morbidelli et al. (2020) al analizar lo planteado por Namouni y Morais encuentran tres grandes fallas en su propuesta; 1) Que la simulación no es un demonio de Laplace. No podemos saber la historia pasada de un sistema integrando su evolución hacia atrás con la suficiente precisión para alcanzar la proyección. La mecánica celeste es en general no-integrable y la mayoría de sus condiciones iniciales conducen a un caos dinámico. Sin embargo, dicen Morbidelli et al, que se puede hacer uso de herramientas de mecánica estadística para describir un flujo de partículas en trayectorias caóticas, pero estas no reproducen la evolución “real” del sistema. Esto se debe a que la

9 1 Gigaño equivale a mil millones de años.

entropía del sistema disminuiría en relación a la segunda ley de la termodinámica. 2) No podemos presumir que el sistema solar que observamos hoy se comportaba de la misma manera hace 4.5 Ga lo cual es absurdo. Y por último 3) Namouni y Morais negligian de forma a priori la posibilidad de que esos objetos inestables son efectivamente representantes de objetos que estaban transitando y se mantienen en un estado estacionario por un determinado periodo lo cual es el escenario más probable.

Este segundo caso muestra claramente una consecuencia del abuso de una simulación con el fin de encontrar objetos interestelares. En este caso no tenemos necesidad de analizar el código de la simulación para poder estimar la validez de la simulación. La metodología usada, la negligencia de los investigadores en aplicar modelos ya existentes y la mala aplicación de ciertos principios matemáticos clásicos para la modelización son suficientes para no acordar con los resultados e interpretaciones obtenidos por Namouni y Morais. En este caso existe un abuso interpretativo sobre los resultados del modelo, pero por otro lado las variables libres han sido completamente compensadas para adecuarse con un resultado deseado. En relación al código mismo este no tiene relevancia para generar algún tipo de conocimiento ya que no respecta ni siquiera un principio básico como la dinámica evolutiva del sistema solar que no puede ser codificada tan fácilmente. El código si bien puede ser considerado como un tipo de conocimiento posee limitaciones claras respecto de su alcance y aplicación para modelar algunos fenómenos.

Consideraciones finales

Desde Aarseth la forma de considerar las simulaciones computacionales como generadores de conocimiento ha dado lugar a nuevas formas de pensar el rol que posee un código. El código que pertenece a una simulación es cada vez más considerado como un cuerpo de conocimiento que pertenece a un individuo o comunidad. Algunas ventajas de este cambio es que permiten fortalecer el intercambio de datos, observaciones entre distintos grupos con mayor facilidad y así validar hipótesis planteadas por la comunidad. También, permiten recolectar datos o simular observaciones que no podrían ser realizadas mediante observaciones convencionales y en algunos casos crear un marco predictivo que antecede la observación de algunos objetos con el fin de encontrarlos en un determinado lugar. Sin

embargo, el uso extensivo y poco cuidadoso de ciertas simulaciones computacionales han dado lugar a considerar que el algoritmo o código usado no sólo es fuente de conocimiento, sino que provee los datos necesarios para validar, en algunos casos, hipótesis que contradicen las observaciones convencionales.

Bibliografía

- Aarseth, S. J. (1985). Direct methods for N-body simulations. En Brackbill, J. U. y Cohen, B. I. (Eds) *Multiple Time Scales*. Academic Press, 377-418. ISBN 9780121234201.
- Heng, K. (2014). The Nature of Scientific Proof in the Age of Simulations. *American Scientist*, 102(3), 174–177.
- Hoyle, F., y Schwarzschild, M., (1955). On the Evolution of Type II Stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2, 1. doi:10.1086/190015.
- Katz, J. I. (2021). Oumuamua is not Artificial. Recuperado el 28/05/2021 de <https://arxiv.org/pdf/2102.07871.pdf>
- Knight, M. M., et al. (2017). On the Rotation Period and Shape of the Hyperbolic Asteroid 1I/'Oumuamua (2017 U1) from Its Light-curve. *ApJL*, 851, L31. Recuperado el 28/05/2020 de <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/aa9d81>
- Loeb, A., y Bialy, S. (2018). Could Solar Radiation Pressure Explain 'Oumuamua's Peculiar Acceleration? *ApJL*, 868, L1. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaeda8>
- Meech, K. J., et al. (2017). A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid. *Nature*. <http://dx.doi.org/10.1038/nature25020>.

- Micheli, M. Farnocchia, D., et al. (2018). Non-gravitational acceleration in the trajectory of 1I/2017 U1 ('Oumuamua). *Nature*, 559, 223–226. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0254-4>
- Morbidelli, A., et al. (2020). No evidence for interstellar planetesimals trapped in the Solar system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 497(1), 46–49. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa111>
- Namouni, F., y Morais, M. H. M. (2018). An interstellar origin for Jupiter's retrograde co-orbital asteroid. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. 477(1), 117–121. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly057>
- Namouni, F., y Morais, M. H. M. (2020). An interstellar origin for high-inclination Centaurs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 494(2), 2191–2199, <https://doi.org/10.1093/mnras/staa712>
- Oberkampff, W., y Roy, C. (2010). *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511760396
- Pillepich, A., Springel, V., Nelson, D., Genel, S., Naiman, J., Pakmor, R., Hernquist, L., Torrey, P., Vogelsberger, M., Weinberger, R., & Marinacci, F. (2018). Simulating Galaxy Formation with the IllustrisTNG Model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473(3), 4077–4106. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2656>
- Roundtree, A. K. (2010). The rhetoric of computer simulations in astrophysics: a case study. *JCOM*, 9(3).
- Scannapieco, C., et al. (2012). The Aquila comparison project: the effects of feedback and numerical methods on simulations of galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423(2), 1726–1749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20993.x>

- Seligman, D., Laughlin, G., y Batygin, K. (2019). On the Anomalous Acceleration of 1I/2017 U1 'Oumuamua.arXiv e-prints. Recuperado el 28/05/2021 de <https://arxiv.org/abs/1903.04723>.
- Simon, H. A., y Newell, A. (1971). Human problem solving: The state of the theory in 1970. *American Psychologist*, 26, 145–159.
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., Frenk, C. S., Yoshida, N., Gao, L., Navarro, J., Thacker, R., Croton, D., Helly, J., Peacock, J. A., Cole, S., Thomas, P., Couchman, H., Evrard, A., Colberg, J., & Pearce, F. (2005). Simulating the joint evolution of quasars, galaxies and their large-scale distribution. *Nature*, 435(7042), 629–636. <https://doi.org/10.1038/nature03597>
- Springel, V. (2005). The cosmological simulation code gadget-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364(4), 1105–1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x>
- Stone J. M., Mihalas D., Norman M. L. (1992). ZEUS-2D: A radiation magnetohydrodynamics code for astrophysical flows in two space dimensions. III - The radiation hydrodynamic algorithms and tests. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 80, 819–845. ISSN 0067-0049.
- Teyssier, R., Commerçon, B. (2019). Numerical Methods for Simulating Star Formation. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6. DOI=10.3389/fspas.2019.00051
- Trilling, D. E., et al. (2018), Spitzer Observations of Interstellar Object 1I/Oumuamua. *The Astronomical Journal*, 156(6), 261.
- Von Neumann, J., y Goldstine, H. H. (1947). Numerical inverting of matrices of high order. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 53(11), 1021–1099.
- Wang, B. (noviembre, 2018). Many anomalies of interstellar Oumuamua are explained if it was an alien solar sail. Recuperado el

28/05/2021 de <https://www.nextbigfuture.com/2018/11/many-anomalies-of-interstellar-oumuamua-are-explained-if-it-was-an-alien-solar-sail.html>

Wilhelm, K., y Dwivedi, B. (2020). Anomalous Sun Flyby of 1I/2017 U1 ('Oumuamua). *Galaxies*, 8(4), 83. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/galaxies8040083>

Zhang, Y. y Lin, D. N. C. (2020). Tidal fragmentation as the origin of 1I/2017 U1 ('Oumuamua). *Nat Astron*, 4, 852–860. <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1065-8>

Portegies Zwart, S., Torres, S., Pelupessy, I., Bédorf, J., y Cai, M. X. (2018). The origin of interstellar asteroidal objects like 1I/2017 U1 'Oumuamua. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 479(1), 17–22. doi:10.1093/mnras/sly088.

