

## Sobre el modelo de Wolfram

Nuestro universo actual, desde un punto de vista físico, puede diseccionarse en tres grandes partes: un microcosmos, un mesocosmos y un macrocosmos. La física del día a día, aquella que vemos funcionar en autos, maquinas y de la que *somos conscientes directamente* es lo que llamamos *mesocosmos*. Ahí vivimos nosotros, y se caracteriza por que todo es comparable con la escala humana. Si consideramos objetos tan grandes como galaxias, cúmulos y demás objetos astrofísicos que son regidos por la fuerza de gravedad, podríamos estar hablando del *macrocosmos*. En esta porción no tiene mucho sentido hablar de escalas humanas pues, como dijo Carl Sagan, “la vida del hombre es apenas un suspiro en el tiempo cósmico” (Cosmos). Y finalmente, el *microcosmos* es la parte mas pequeña del universo, inaccesible a nosotros directamente. Requerimos de medidas indirectas para lograr vislumbrar lo que sucede allí. Esta parte del cosmos se ha vuelto muy popular últimamente en los comics y en las películas de Marvel, pues allí le suelen llamar el reino cuántico.

Dejando de lado la parte fantástica, el microcosmos podríamos decir que empieza desde las escalas nanoscópicas ( $10^{-9}$  m) hacia abajo. Aquí, las reglas son dictadas por la mecánica cuántica y su fenomenología. Si se reduce más y más la escala, pasado por la escala atómica ( $10^{-10}$  m) y nuclear ( $10^{-15}$  m), lo cual en términos de física de partículas elementales es tener procesos de energías muchísimo más altas que las producidas el LHC, la maquina mas grande en la actualidad, se llega a las *escalas de Planck* ( $10^{-35}$  m), la mecánica cuántica y la gravedad podrían encontrarse. En este punto, los físicos teóricos han hablado del fenómeno de *surgimiento del espacio-tiempo* (o *space-time emergence*), que trata de abordar la pregunta de cómo surgió el espacio-tiempo donde observamos los fenómenos físicos. Esta pregunta se ha abordado desde la perspectiva de la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de lazo cerrado (loop quantum gravity) o la correspondencia AdS/QFT entre otras. Pero, cabe mencionar que, comprender la física que rodea a esta pregunta puede dar luces a como, desde el surgimiento del espacio-tiempo como ente físico, las demás fuerzas fundamentales fueron apareciendo. Es aquí donde llega la teoría de Stephen Wolfram a competir con las demás propuestas [1].

Es bueno mencionar que, tanto la teoría general de la relatividad (la actual descripción de la gravedad en el macrocosmos) y la mecánica cuántica han dado excelentes resultados experimentales, probando ser la senda correcta a seguir en el estudio de estos fenómenos. El problema radica que los efectos de la una son despreciables en el rango de acción de la otra. En otras palabras, en el mesocosmos y el macrocosmos no se ven efectos cuánticos, y en el microcosmos, la fuerza de gravedad es muy débil frente a sus colegas la fuerzas electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. Por ello, responder la pregunta de como surge el espacio-tiempo plantea desafíos teóricos y fenomenológicos muy fuertes.

Ahora si, vamos con el modelo de Wolfram. Este modelo es inspirado en la lógica de programación funcional: dado un conjunto de elementos discretos, y un conjunto de reglas que operan entre ellos, puedo construir mas elementos en dicho conjunto. A medida que se aplican estas reglas sucesivamente se puede construir estructuras altamente complejas,

que van adquiriendo el carácter geométrico de una superficie, o mas general, de una variedad. En otras palabras, arrancando de una estructura puramente combinatorial, dada por los elementos y las reglas entre ellos, emerge una estructura geométrica al cabo de  $N$  aplicaciones sucesivas de las reglas. Si  $N$  se hace muy grande, al final podría tener una estructura “continua” hecha a partir de elementos discretos, tal como es la materia misma. Este fenómeno de escalamiento es muy conocido en la física, se denomina *granularidad* (coarse-grained) y toma en cuenta como se articula un “todo” a partir de incrementar el numero de sus componentes, o lo que es equivalente, aumentar la escala.

Pero, en que momento se debería detener el proceso de iterar una y otra vez el conjunto de reglas sobre el conjunto discreto. Según el trabajo de Wolfram, a medida que la estructura geométrica emerge, y mas y mas puntos van apareciendo en la grilla, el volumen de puntos va tendiendo hacia el volumen de la estructura geométrica formada. Así por ejemplo, si para un cierto conjunto de puntos y reglas, el volumen de puntos a una distancia  $r$  de un punto  $X$  en el conjunto puede escribirse como  $V(r) = \frac{2^d}{d!} r^d + \frac{2^{d-1}}{(d-1)!} r^{2d-1} \dots$ . El termino dominante lleva la información de la dimensionalidad  $d$  de la geometría emergente, y por lo tanto, permite también definir un sentido de curvatura. Es en este sentido que Wolfram afirma que una conjunto de elementos y sus reglas pueden generar estructuras geométricas dotadas de curvatura, que casualmente, son las mismas que podrían usarse para describir el espacio-tiempo. Estas estructuras geométricas emergentes se denominan *hipergráficas*. Tomando en cuenta que, según, la relatividad general, la curvatura es una medida del efecto de la gravedad, Wolfram en su modelo está planteando una solución a como el espacio-tiempo emerge.

La hipótesis que conecta este modelo con la física es que todo el Universo, tanto su estructura espacio-temporal como su contenido (materia, materia oscura, energía oscura, radiación, neutrinos y demás), esta representado por la evolución de una hipergráfica. El espacio-tiempo continuo que conocemos emerge *naturalmente* como consecuencia de la granularidad del modelo. El contenido del universo aparece como aglomeraciones locales de puntos que evolucionan localmente. Las partículas elementales que componen toda la materia surgen entonces como una manifestación de la evolución estable de tales aglomeraciones de puntos. Como la evolución no es univoca, es decir, las reglas de aplicación no son únicas, la naturaleza cuántica (probabilística) del microcosmos emerge como consecuencia de la evolución de la hipergráfica. De forma similar, la continua evolución de estos agregados locales de puntos eventualmente haría aparecer estructuras mas complejas, tales como átomos, estrellas, galaxias,..., etc... y al final, nosotros.

Pero, tiene bastantes limitantes practicas. Computacionalmente requiere altísimos recursos, por un lado. Por el otro, el surgimiento de las simetrías básicas que observa la física, tal como la invarianza Lorentz, la unitariedad o la simetría gauge, no es claro. Cómo debe darse la evolución de la hipergráfica para que, de entre los miles de millones de posibilidades, pueda observarse el Universo actual no es del todo claro. El mismo Wolfram reconoce que este punto debe trabajarse más y plantea el reto para quienes decidan entrar

en esa línea de investigación. En lo personal, es bastante complejo llegar a cumplir tan ambiciosa meta, pues la validez de las otras descripciones de la física (teoría general de la relatividad, mecánica cuántica, teoría cuántica de campos y demás) es bastante amplia y plenamente demostrada. En cuanto al modelo de Wolfram, cuestiones tan vitales como la reversibilidad de los procesos o la estructura del vacío no son del todo directas y claras. En el modelo, casi todo se resume a como la física observada surge de la intrincada capacidad de computo de los elementos y las reglas de la hipergráfica universal. La mayoría de las críticas a Wolfram van en la línea de que no reproduce resultados teóricos conocidos validados por los experimentos, o de que es mas un modelo computacional que físico [2], pues ellos están en la búsqueda de qué reglas aplicadas a la hipergráfica dan como resultado un universo como el nuestro.

Desde un punto de vista fenomenológico, parece plausible el modelo de Wolfram, pues muestra como evoluciona el Universo desde el micro al macrocosmos, pero carece de resultados teóricos confrontables con el experimento.

#### Referencias

[1] <https://www.wolframphysics.org/technical-introduction/>

[2] <https://www.scientificamerican.com/article/physicists-criticize-stephen-wolframs-theory-of-everything/>