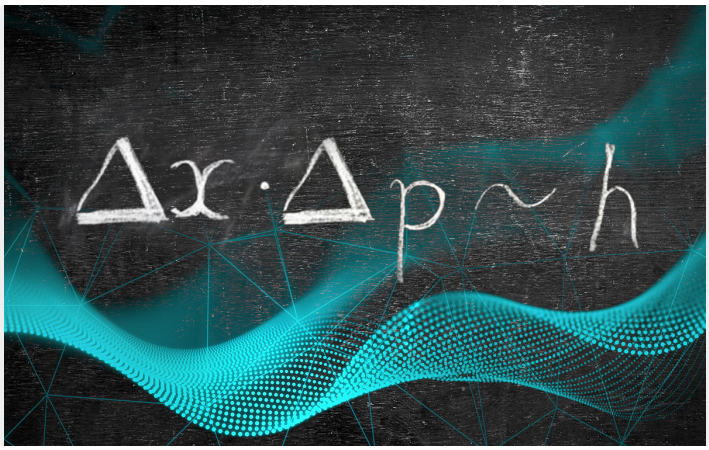
# PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

*Posted on 12 junio, 2019 by Ramón Peralta y Fabi*




**Category:** Ciencia

## Introducción

Este principio de la física, con un nombre inescrutable, elegante e intimidatorio, es uno de los elementos básicos de la Mecánica Cuántica (MC). Es una teoría que, para los no iniciados, hace humildes a los de otras disciplinas, amén de confundir a algunos de los que dicen conocerla. Ciertamente la MC es una de nuestras teorías más exitosas y generales, prediciendo cómo responde el mundo microscópico cuando interactuamos con él. Este mundo de átomos y moléculas está descrito por ella, sin fallar (hasta hoy).

El Principio de incertidumbre de Heisenberg (pronunciado jaisenberg), es un elemento central en las interpretaciones de la MC, y aquí, tras describirlo se esbozará el debate en torno a su interpretación, y exhibirán algunas de las formas en que se invoca el principio, fuera de su contexto y sin su

comprensión, para justificar tonterías.

En su versión más sencilla, el principio (PI) establece que hay cantidades en la física, como la posición de un objeto y su velocidad, que cuando se desean medir las dos al mismo tiempo, hay una imprecisión o una incertidumbre en ambas con un límite inferior ineludible; no se pueden mejorar los experimentos más allá del límite que marca el PI. En otras palabras, hay variables, que se presentan en parejas especiales, en las que la determinación del valor de una, necesaria e inevitablemente, afecta el valor de la otra. No deja de sorprender la extraña limitación que la Naturaleza impone a algunas de nuestras mediciones. En suma, establece que el error combinado (multiplicado) no puede ser menor que una constante universal, llamada la constante de Planck, que -afortunadamente- es muy, pero muy pequeña (representada por el símbolo $\hbar$, hache barra. Otras constantes universales son la velocidad de la luz "c" y la constante de la gravitación universal, "G"). A las parejas de variables se les llama *canónicas conjugadas o complementarias*, y cuanto más preciso el valor que se logra en la una, cuanto más grande el error al determinar la otra, de modo que se satisfaga la restricción. Suena terrible, y en cierto sentido lo es; por otro lado, no debe enredarnos demasiado, aunque la gente se empeña en oscurecerlo. El calificativo de canónicas conjugadas de estas variables aquí tiene la intención de enfatizar el carácter específico que deben tener, y no son cualquier pareja de cantidades; ejemplos típicos son posición-momento, su versión en giro o rotación, y energía-tiempo.

Siguiendo con el ejemplo anterior, en un lenguaje un poco más técnico, el principio establece que en tanto más precisa sea la determinación de la posición de un objeto, tanto menos podremos saber sobre su estado de movimiento. A éste lo definimos -casi siempre- como el producto de la masa ($m$) y la velocidad ($v$) del objeto, y le llamamos "momento o cantidad de movimiento, $\rho=mv$". Si el objeto se mueve sobre una línea recta, digamos, y decimos que su posición es $\chi$ y que la incertidumbre en su posición es $\Delta\chi$, el valor "real" de $\chi$ está entre $\chi-\Delta\chi/2$ y $\Delta\chi/2$. Entonces, si las incertidumbres de cada una son $\Delta\chi$ y $\Delta\rho$, el principio establece que el producto de ambas no puede ser menor que $\hbar$. Es decir:

$$\Delta\rho \times \Delta\chi = \hbar$$

En el mejor de los casos, el producto será igual a $\hbar$. Así, yendo al extremo, si la posición se sabe con una precisión absoluta (lo que no puede hacerse), el estado de movimiento es completamente desconocido. Este inusual comportamiento ocurre en un ámbito en el que tenemos cero experiencia e intuición. Es el de los átomos y sus componentes, donde la teoría nos permite predecir lo que ocurre, con cierta probabilidad, pero impecablemente determinada.

Una ilustración esquemática puede ayudar a entender el origen de la incertidumbre cuántica. Para obtener la posición y la velocidad de un objeto, usualmente se usa una cámara, pues se requieren dos fotografías. Se ilumina una pelota de béisbol, digamos, y al reflejar la luz y reaccionar ésta con una película fotosensible, se ubica con precisión la bola, de la primera foto. Se da por sentado que

hay un fondo atrás (sistema de referencia) que sirve para posicionar la pelota. Al repetir el proceso otra vez, un tiempo bien determinado después, se halla una nueva ubicación de la bola, la segunda foto. En cada una se determina la posición sin problema. La velocidad resulta de tomar la distancia recorrida, es decir, el cambio en posición extraído de las dos fotos, y dividirla entre el tiempo entre las fotos. Así, por ejemplo, medimos 72 kilómetros por hora, o unos 20 metros por segundo, que logran los *pitchers* sin mucho problema. Cuantas más fotos en intervalos diferentes se tengan, mayor será la certidumbre de las mediciones del movimiento y la posición de la pelota. Cabe aclarar que la luz afecta al movimiento de la pelota, pero la masa de esta última es tan grande que el "empujón" que recibe de la luz es no medible (un radiómetro exhibe la presión de la radiación).



Imaginemos ahora que la pelota se hace más chica, muchísimo más chica; la hacemos mil veces más pequeña, y repetimos esto tres veces, hasta una milmillonésima de la primera. Ahora estamos en el ambiente cuántico, el de las moléculas y los átomos. Para ubicar a esta nano-bola, la primera fotografía se hace igual, con fotones y una película (el prefijo nano indica algo mil millones de veces más pequeño). Problema: los fotones sacan a la bolita de su camino y ya no la hallamos; al localizarla en el espacio, hemos perdido la esperanza de una segunda foto para calcular su velocidad. Esta *caricatura* del proceso de medición muestra aspectos de la dinámica atómica, y parte de la complejidad de la interacción observador-objeto.

## La formulación de la Mecánica Cuántica (MC)

En el supuesto de que lo anterior es medianamente comprensible, son pertinentes algunos datos sobre la génesis del principio, antes de bordar sobre sus interpretaciones y algunas extrapolaciones que aparecen en la literatura iletrada.


Werner Heisenberg

En la entonces pequeña ciudad alemana de Würzburg, entre Frankfurt y Nüremberg, nació Werner Heisenberg (1901-1976), con un hermano mayor por un año, Erwin, quien se dedicó a la química. Cuando su familia se trasladó a Munich en 1911, ingresó al Gimnasio (nada relacionado con deportes) y destacó como alumno en matemáticas, física y religión, graduándose entre los mejores de su generación en 1920. Entró a la Universidad, donde estudió física y matemáticas, doctorándose en 1923, lapso típico de un estudiante de la época; su tesis fue sobre un problema muy difícil que sigue sin solución -la turbulencia en fluidos- en la que poco aportó, bajo la dirección de Arnold Sommerfeld (1868-1951), distinguido científico alemán. Lo sorprendente es que dos años después, habiendo colaborado con Max Born (1882-1970), Pascual Jordan (1902-1980), y Niels Bohr (1885-1962), escribió trabajos clave en el desarrollo de la MC, haciendo una formulación original que dio cuerpo a la nueva teoría; la *formulación matricial* (Cassidy,1992). En 1927 publicó el trabajo en el que se propuso el Principio de incertidumbre (PI) y que hoy lleva su nombre (Heisenberg, 1927). Todos los científicos mencionados en esta sección recibieron el Premio Nobel de Física, salvo Jordan, quien no lo recibió por su asociación al fascismo alemán, y Sommerfeld, quien fue propuesto formalmente 84 veces, sin que se le otorgara, habiendo sido el mentor del mayor número de físicos famosos de su época.


Steven Weinberg

Heisenberg fue un personaje brillante y controversial, incluido su papel en la potencial fabricación de la bomba atómica alemana durante la 2ª Guerra Mundial, en el régimen Nazi (Frayn, 2000), y por su forma oscura de explicar algunas cosas. La formulación del PI la hizo con matemáticas sencillas, pero confusas. Cabe agregar que la "incertidumbre" no fue algo que Heisenberg aclarara en su artículo original, sino que, en sus palabras, la intención del artículo fue hacer una descripción cualitativa de su reflexión. Steven Weinberg (1933-), con intereses en los fundamentos de la física y en la historia de la ciencia, confiesa no haber podido seguir la argumentación usada por Heisenberg en un afán por entender su deducción (Holt, 2018). En varios artículos de Heisenberg y Bohr, se trató de explicar con palabras accesibles el profundo significado del PI, y -me atrevo a decir- sin lograrlo, al menos de manera convincente. La noción básica para ellos es, por ejemplo, que los conceptos de trayectoria o de velocidad de una partícula no son aplicables a sistemas microscópicos; hasta que se lleva a cabo un experimento para saber "por dónde va", la trayectoria se hace real, no existiendo previamente (sic). Justo es aclarar que siempre hubo diferencias no triviales entre lo que Bohr y Heisenberg entendían, ya no se diga con sus colegas. Los artículos fundamentales de los protagonistas y parte de las discusiones técnicas fueron editadas y traducidas al inglés posteriormente; son de fácil acceso, pero no así su cabal comprensión (Wheeler, 1983).

> *¿Es el fotón o un protón una onda o una partícula?*

Adicionalmente, la discusión está siempre entreverada con lo que se llama la complementariedad, palabra introducida por Bohr. De acuerdo con él, y basado en la evidencia del comportamiento de los sistemas cuánticos, como fotones, electrones, moléculas de agua, y demás (en realidad todo, pero no es tan evidente en nosotros) hay un comportamiento ambiguo, entre ondulatorio y corpuscular. Dependiendo de qué clase de experimento se monta, es la respuesta. En el efecto de la colisión con una pantalla fotosensible o con una película muy delgada de material, se verán puntos donde "cayeron" los electrones. ¿Es el fotón o un protón una onda o una partícula? La respuesta es ¡ambas a la vez! Dependiendo de si se quieren explorar unas características u otras, será la respuesta que ofrezcan. En el fondo, no contamos con una palabra que etiquete satisfactoriamente a los objetos cuánticos, que no son ni partículas ni ondas; parecen querer burlar nuestras claras intuiciones macroscópicas.

De acuerdo con Heisenberg, la órbita consiste de una *secuencia discontinua de incertidumbres en velocidad y posición*, regidas por las relaciones halladas por él y donde sólo la medición las pone en

evidencia (Heisenberg, 1974; no será la grabación más clara, ni por la calidad del sonido, ni por la exposición).

Albert Einstein (1879-1955) y Erwin Schrödinger (1887-1961), fueron críticos siempre de esta interpretación, enarbolando la posición de que hay un mundo real, ajeno a los investigadores; el Principio de Realidad. La controversia no ha terminado (Weinberg, 2018; véase también a Gardner, 1992). Cientos de artículos técnicos, tanto por los detalles físicos y matemáticos, como los aspectos filosóficos, se han escrito en este debate, y la controversia no acaba; aborda desde la existencia misma de órbitas entendidas como curvas continuas trazadas por las partículas subatómicas en movimiento, hasta la interpretación de las probabilidades. Éste es un tema complejo que borda hasta en lo personal, como ocurrió entre los mismos creadores de la interpretación. A Einstein mismo se le consideró conservador e incapaz de superar sus prejuicios, al no aceptar la interpretación, una vez "aclarada" por sus autores, Bohr y Heisenberg, en este orden. No debe soslayarse que, tanto Einstein, como Schrödinger contribuyeron al desarrollo de la MC de manera esencial, particularmente el segundo, quien en una serie de trabajos consecutivos en 1927 hizo una propuesta alternativa a la de Heisenberg, y su formulación de la teoría es la más utilizada en la práctica. Para Einstein, la naturaleza existe, es decir, hay una realidad independiente del observador. Los sistemas microscópicos tienen velocidades y posiciones, aunque la MC no permita describirlas de manera detallada, como sí ocurre con las órbitas de los planetas, por ejemplo. Sin embargo, cabe mencionar que las órbitas planetarias son en realidad trayectorias complejas, fruto de la interacción de la Tierra con todos lo objetos del sistema solar; matemáticamente, el Sistema Solar es un sistema caótico. "De lejos" semejan elipses, pero "más de cerca" parecen curvas aleatorias que tratan de ajustarse a las elipses; de hecho, la Tierra nunca ha pasado por el mismo lugar en su traslación en tono al Sol después de cerca de 4,500 millones de años de darle vuelta.



Werner Heisenberg (izq.) con Niels Bohr en una Conferencia en Copenhagen en 1934. Foto: Fermilab, U.S. Department of Energy

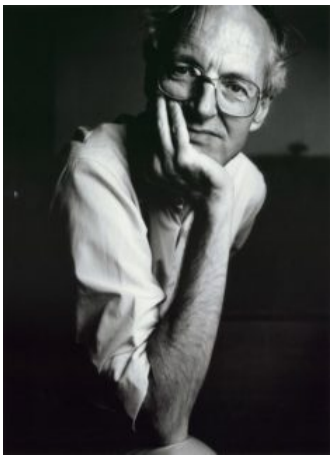
Richard Feynman (1918-1988), Nobel de física y reconocido profesor, afirmó en diversas instancias que en su opinión nadie entendía realmente la MC, particularmente en cuanto al PI y sus interpretaciones se refiere, pero insistió siempre en el rol indispensable del principio como sustento de la teoría. Lo que es claro es que la intuición individual y la experiencia que percibimos a través de los sentidos, poco o nada tienen que ver con el comportamiento de los objetos atómicos.

La relevancia y actualidad del PI, se puso de manifiesto recientemente en la muy publicitada simulación de un paso atrás en el tiempo de una partícula, usando la computadora cuántica de IBM (Lesovik, 2019).

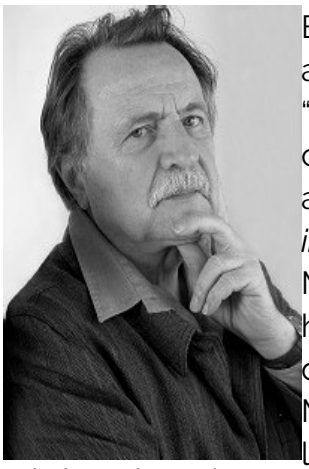
## De los usos y abusos

Las cosas llegan al ridículo cuando resultados de un área se “aplican” en un contexto distinto, sin análisis alguno. Más allá de usar como metáfora una idea de un campo para abrir nuevas reflexiones en otro, el problema aparece cuando se invocan aspectos que claramente no entienden estos

usuarios ocasionales, y sacan conclusiones descabelladas o sin argumentación.


Michael Frayn (1933-)

En la obra teatral de Michael Frayn (1933-) en torno a una conversación que tuvieron Bohr y Heisenberg en 1941, con matices interesantes y conclusiones debatibles, termina escribiendo como un corolario (inconexo) del PI: "*No hay un pensamiento o intención que pueda enunciarse de manera precisa*" (Frayn, 2000). En otra parte, con igual extrapolación y mostrando su desconocimiento de la contribución de su protagonista, Heisenberg, generaliza "…*como no podemos saber la posición exacta de un electrón, no podremos saber con precisión la operación de la mente humana*". Lamentable.


Régis Debray (1940-)

El sociólogo Régis Debray (1940-), en un esfuerzo por argumentar sus tesis, invoca la imprecisión e "incompletez" del lenguaje (Bouveresse,2012), visto éste como sistema formal, citando a Gödel, y en otro texto afirma que "*el mero acto de medir (observar) un fenómeno, inevitablemente lo altera*", lo que semeja las nociones de Margaret Mead (1901-1978) cuando afirma que "los hábitos sexuales de los samoanos son imposibles de determinar, pues se alteraron con su llegada a Samoa". Me pregunto si este tipo de nociones la llevó a promover la Asociación de Parapsicología en los Estados Unidos.


Stanley Aronowitz (1933-)

Stanley Aronowitz (1933-), uno de tantos posmodernistas que ha contribuido al constructivismo cultural, escribió una "crítica de la ciencia" (Aronowitz,1988) en la que sólo exhibe su ignorancia, superficialidad y necesidad de mostrar la tesis insostenible, aunque atractiva, de que la ciencia sólo es fruto de la estructura capitalista de poder. Entre muchas "joyas", dice que "*el principio de incertidumbre es prueba de la inestabilidad de la hermenéutica objeto-sujeto, que mina la objetividad de la ciencia*"; sospecho que él tampoco entiende su frase, y que además nos permite entender el "asunto Sokal", lo que a su público y compañía sigue irritando después de veinte años. En un artículo (Sokal, 1996) de contenido absurdo, con muchísimas citas, y en un lenguaje típico de algunos académicos del área

> social, Alan Sokal (1955-), físico de la UNY, mostró cómo escribiendo de manera oscura, exuberante y con fuentes de alto nivel e importantes, se puede engañar a una revista "prestigiada" del ámbito social y a una parte de la comunidad correspondiente, como en el cuento del "traje invisible del emperador ".

El PI es un elemento clave en la MC, que además de su relevancia en la explicación de diversas situaciones y fenómenos (Feynman,1965), y de que permite determinar criterios para discernir entre teorías de campo (relativistas) alternativas (Weinberg,2018), posee un contenido filosófico, conceptual, que ha abierto muchas reflexiones y -desafortunadamente- divagaciones. Para algunos filósofos y sociólogos, presas del relativismo, es una especie de enfermedad epistemológica que muestra la incapacidad de la física de proveer de información confiable sobre el mundo, creyendo religiosamente que han exhibido el relativismo de la ciencia, sin argumento alguno y, por cierto, con el desdén de quienes hacemos ciencia.

## Incertidumbre donde hay y donde no la hay

Con la vasta literatura especializada sobre el tema, y la que se vincula por razones esotéricas, uno se pregunta qué pensarían los creadores de la teoría si leyeran muchas de las disquisiciones posteriores a su contribución. Ciertamente ellos no estuvieron libres de confusión o discusión sobre sus interpretaciones. Hay físicos que asocian al PI con nuestra incapacidad inherente para medir con precisión; que podríamos llamar la interpretación *epistémica*, en la que el origen del error está en quien mide, en el investigador. Hay quienes, como Bohr, con la interpretación *ontológica*, ponen la incertidumbre en la Naturaleza, en la realidad, pues no hay velocidad y posición bien definidos, por ejemplo.

> *¿Qué hace un electrón en un átomo cuando éste se ilumina?*

Varios elementos juegan un papel central en las discusiones sobre las interpretaciones de distintas facetas de la MC. Uno es la posición sobre la realidad, es decir, el aceptar que hay una realidad objetiva, independiente de quien observa y con la que se interacciona; el realismo de Einstein contrasta con la posición de quienes consideran irrelevantes las preguntas que no son susceptibles de ser medidas o exploradas. ¿Qué hace un electrón en un átomo cuando éste se ilumina? Sabemos que se "excita", absorbe uno o más "cuantos" de energía (fotones), y, tiempo después, los "devuelve" en alguna dirección, con el correspondiente "recular" del átomo. ¿Qué hace entre tanto, cómo se mueve en el átomo en su necesario movimiento alrededor del núcleo?, etc., son preguntas que Bohr

diría que no tienen sentido, no se deben formular hasta en tanto no se propongan experimentos para investigarlo y entonces, con el detalle, puedan calcularse las probabilidades de observar cada uno de los resultados posibles; son probabilidades en tanto que, para Bohr, la Naturaleza es intrínsecamente impredecible, en su detalle. Para Einstein la teoría es incompleta por no contar con correspondencias unívocas; el protón se mueve con cierta velocidad y va pasando por diferentes ambientes y ocupando posiciones determinadas, y la teoría debe ser capaz de decir por qué hay incertidumbre o dispersión en los posibles valores de estas cantidades que caracterizan el estado dinámico del protón, y entonces ofrecer luz sobre el origen de esas probabilidades. Afirmar que "porque así es la naturaleza", no satisface a todos.

El principio de incertidumbre es una parte esencial de la MC y tiene un carácter predictivo ante muy distintas circunstancias del mundo subatómico. Al margen de las interpretaciones, el aparato matemático, que es relativamente sencillo, es impecable para casi todas las situaciones. Alguien dijo al respecto de las interpretaciones, "mejor cállate y calcula". La clave es no sacar de contexto las cosas.

> *Todos quisiéramos poder explicar de manera sencilla todos los fenómenos en nuestro entorno.*

Todos quisiéramos poder explicar de manera sencilla todos los fenómenos en nuestro entorno. Algunas observaciones, ya de por sí complejas, como las ráfagas de rayos X que recibimos esporádicamente del firmamento, la operación detallada de un láser o de un fotodiodo, de las ondas gravitacionales, o nuestros procesos mentales vistos en una máquina de resonancia, no se pueden exponer en una escuela primaria, salvo de modo descriptivo y esquemático. La ciencia avanza como fruto de un esfuerzo colectivo en el que se participa de manera universal en todos los contextos. Nada hay de relativo en lo que esta estrategia de obtención de conocimiento ha logrado; afirmar que es fruto de la cultura capitalista, de la idiosincrasia de un pueblo o de los oscuros intereses de las empresas trasnacionales es perder de vista el bosque porque un árbol se halla enfrente (Gross,1998). Ni Newton fue producto de las élites acomodadas de la Inglaterra de su época, más necesitada de hallar la longitud y la latitud para sus barcos que de explicar las órbitas keplerianas, ni Einstein fue el resultado de la cultura semítica del capitalismo decimonónico, que en nada estaba interesado en la electrodinámica y sistemas de referencia. Igual con Galileo, Spinoza, Erdös, Arquímedes o Gödel.

Con recursos, motivaciones, y circunstancias muy diversas, casi ajenas a la cultura, se han hilvanado los fragmentos de lo que hoy tenemos como concepción del mundo, y que cambiará -seguramente- en las siguientes décadas. No hay ciencia mexicana, ni hitita, como no hay ciencia lacustre o saturnina. Hay problemas y prioridades sociales que influyen, desde luego, en la distribución de recursos y la oferta de oportunidades. Se inyecta presupuesto en el cáncer y en la exploración profunda del petróleo, en la creación de vacunas en laboratorios nacionales, y en el

desarrollo de infraestructura educativa y comunicativa. Numerosas empresas invierten presupuestos importantes en investigación y desarrollo. Pero hay quienes persiguen el origen de la materia oscura, la gravedad cuántica y la turbulencia en fluidos, y no son ni agentes del imperialismo de oriente o de occidente, ni feministas constructivistas, ni humanistas posmodernos, ni afro-centristas, ni neoliberales insensibles. Son biólogos de Burundi, Costa Rica y Alemania, son matemáticos de Bali, de Francia y de Bolivia, son físicos y químicos en México, la República Checa, los Estados Unidos y Corea del Sur. $C^2$

## Referencias


- Aronowitz S (1988) *Science as Power: Discourse and Ideology in Modern Society*, University of Minnesota Press, USA
- Bouveresse J (2012) « Qu'apellent-ils ¨penser¨? *Quelques remarques à propos de "l'affaire Sokal" et de ses suites* », Athena. P Perroud, Université de Geneve. http://athena.unige.ch/, Conferencia dictada en1998
- Cassidy D C (1992) *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*, W.H. Freeman, NY
- Feynman R P, Leighton R B, Sands M (1965) *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts
- Frayn M (2000) Copenhagen,  Anchor books, NY; ver Volpi J (1999) *En busca de Klingsor*, Ed. Seix Barral, México; véase también Cassidy D C, 1992
- Gardner M (1992) *On the Wild Side*, Prometheus Books, NY; véase Cap. 26
- Gross P R y Levitt N (1998) *Higher superstition: the academic left and its quarrels with science*, Johns Hopkins University Press, Md, USA
- Heisenberg W (1927) "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik". Zeitschrift für Physik, **43**, 172-198
- Heisenberg W (1974) https://history.aip.org/history/exhibits/heisenberg/voice1_text.htm
- Holt J (2018) *When Einstein Walked with Gödel Farrar*, Straus and Giroux, NY
- Lesovik, G. B., Sadovsky, I. A., Suslov, M. V., Lebedev, A. V., Vinokur, V. M., 2019, "Arrow of time and its reversal on the IBM quantum computer", Scientific Reports 9, Art. No. 4396
- Sokal A (1996) "Transgressing the Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity". *Social Text*. **46/47**, 217–252; Sokal A y Bricmont J (1997) *Impostures intellectuelles*, Editions Odile Jacob, Paris.
- Weinberg, S., (2018) *Third Thoughts,* Harvard University Press, London
- Wheeler J A y Zurek W H (1983) Eds. *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press