

Ing. José Luis Palomanes

Ingeniero Químico (Universidad Tecnológica Nacional)
Profesor Facultad de Ingeniería - UdeMM

Estructura matemática de la teoría de la relatividad

Epistemología - Ciencia revolucionaria

Una definición de Epistemología puede ser la siguiente: "Estudio de la estructura, validez y producción del conocimiento científico". Está vinculada a la Historia de la Ciencia y a la Filosofía de la Ciencia.

Proviene del término griego *episteme* que significa conocimiento adquirido mediante un método sistemático, válido desde sus axiomas o postulados y/o verificable por observación. El término griego opuesto es *doxa*, que significa opinión vulgar.

En las corrientes epistemológicas contemporáneas ocupa un lugar polémico al interior de las disciplinas científicas, Thomas Khun, quien acuñó el término paradigma que levantó grandes polvaredas de opinión cuando publicó su obra "La estructura de las revoluciones científicas" en 1962.

En ese libro catalogaba de "ciencia normal" a los períodos de producción y acumulación de conocimientos, bajo teorías aceptadas como dogmas. Estos períodos son largos y

fructíferos. Y llamaba "ciencia revolucionaria" a los períodos donde un paradigma es cuestionado, luego derrocado y sustituido por otro.

Ejemplos sencillos son los de la física y lógica aristotélica y la geometría de Euclides, cuyos principios permanecieron incólumes durante siglos. El sistema astronómico geocéntrico ptolemeico, que fue sustituido por el heliocéntrico copernicano. La física de graves de Galileo y la física Newtoniana. Y, a su vez, ésta última con la física Einsteiniana.

Según la tesis de Khun, la ciencia se desarrolla durante largos períodos donde la validez de las teorías no se cuestiona y de cortos períodos de ruptura epistemológica.

Esa ruptura epistemológica que se produce durante el período de ciencia revolucionaria, se caracteriza por la *inconmensurabilidad* de los términos entre paradigmas. Luego, veremos que los términos *masa*, *longitud* y *tiempo* tienen significados diferentes en la física de Newton y en la de

Einstein. Fundamentalmente, porque en aquella eran términos absolutos y en la teoría de la relatividad son, valga la redundancia, relativos.

De cualquier manera hay que admitir que en la teoría de la relatividad subsiste como término absoluto la velocidad de la luz (c) y, en la física, la carga eléctrica y la temperatura absoluta, así como en la química las entropías molares de las sustancias, entre otros términos absolutos según cada disciplina.

Como habíamos anticipado, esto levantó opiniones encendidas entre muchos científicos porque el término paradigma se usaba en la obra de Khun con hasta veintidós significados diferentes. Como ejemplo transcribo la opinión de Karl Popper:

"La ciencia normal es la actividad del científico no demasiado crítico, o del estudiante de ciencias que acepta el dogma dominante del momento, que no quiere desafiarlo y que sólo acepta una teoría revolucionaria cuando ya se puso de moda (...). Es un fenómeno que

no me gusta (...). El científico normal, como lo describe Khun, es una persona por la que deberíamos sentir lástima."

"*La ciencia normal y sus peligros*". Karl Popper. 1975, p. 16.

Otro epistemólogo contemporáneo que no acordaba con Khun, fue Imre Lakatos, al menos en la apreciación de que aquél tenía una visión elitista de la ciencia, porque nadie puede estar calificado para juzgar a los científicos y a sus teorías más que los integrantes de la propia élite científica.

Las críticas fueron muy variadas y por eso Khun publicó en 1970 otro libro donde se licuaban las partes más ríspidas de su tesis y que tituló: "Algo más sobre paradigmas". Con ello aplacó las opiniones más severas.

La tesis "anarquista" de Paul Feyerabend, va incluso más allá que la de Khun, y se refleja en la siguiente cita:

"La interpretación de un lenguaje observacional viene determinada por las teorías que empleemos para explicar lo que observamos, y cambia tan pronto cambian las teorías. (...) son los informes observacionales los que parasitan sobre las teorías"

"*An attempt at a Realistic Interpretation of Experience*". Paul K. Feyerabend, pp. 160-162

Como se suele definir al paradigma (teoría) como un modelo o patrón para extraer conclusiones respecto a fenómenos de la realidad, el método hipotético-deductivo de la investigación científica, llamado *modelo standard*, tuvo predicamento entre las décadas del cincuenta y sesenta en el ámbito científico de habla inglesa

y alemana, aunque luego surgieron fundadas críticas que hoy están en debate. Se trata pues, de una cuestión opinable al interior de la comunidad científica.

Estos modelos (paradigmas Kuhnianos), se expresan en forma matemática como fórmulas acompañadas de un *diccionario*, es decir, de una explicación del significado de los términos que intervienen en ellas.

De aquí que, para validar las teorías, hay que hallar la fórmula o fórmulas cuya aplicación a la observación de un fenómeno sea contrastable.

Esto hace que la división propuesta por Rudolf Carnap, entre *ciencias formales* (lógica, matemática y física-matemática) y *ciencias fácticas* (todas las demás), sea de utilidad para este tema.

Otros conceptos necesarios que la Epistemología recibe de la Historia de la Ciencia y de la Filosofía de la Ciencia, con respecto a las teorías científicas, tiene que ver con los *Contextos*. Interesan el *Contexto de Descubrimiento*, el *Contexto de Justificación*, y el *Contexto de Aplicación*. Porque si nos referimos al contexto de justificación, la estructura matemática de la teoría de la relatividad es crucial y relevante para que se constituya en ciencia revolucionaria. Es más, puede tener incidencia clave en el contexto de descubrimiento, como veremos luego.

Por fortuna (avances tecnológicos descomunales) y por desgracia (amenaza nuclear y deterioro planetario), el contexto de aplicación ha validado sobradamente la teoría de la relatividad.

La validación de las teorías científicas, según el epistemólogo Karl Popper se puede lograr mediante la contrastación y refutación, lo cual es conocido como el falsacionismo popperiano. Consiste en oponerle otra teoría y verificar si es falsable.

Desde Aristóteles la matemática es la ciencia por excelencia, que apoya a otras disciplinas en la demostración, formulación y cálculo de las leyes derivadas de la observación de la naturaleza.

Las Geometrías no euclidianas

Los Sistemas Axiomático - Formales

Hasta la ruptura einsteniana provocada por su teoría de la relatividad (especial - 1905 y general - 1916), la física newtoniana tuvo un significativo éxito y la base matemática de esas teorías fue la Geometría de Euclides, considerada hasta el siglo XIX como incuestionable. Además, a Newton y Leibniz se les reconoce como principales creadores del Cálculo Infinitesimal.

Fue precursor de las geometrías no euclidianas, el sacerdote jesuita G. Saccheri (1667-1773), quien creyó demostrar el quinto postulado de Euclides mediante su método del "cuadrilátero" y la hipótesis del ángulo recto. Ya desde antiguo se creía que ese postulado era un teorema susceptible de ser demostrado. Saccheri, además, intentó demostrarlo mediante la hipótesis del ángulo agudo y no llegó a contradicción alguna, sin darse cuenta que había demostrado algunas de las proposiciones características de las geometrías no euclidianas.

El matemático alemán Karl F. Gauss (1777-1855) intentó una demostración por el absurdo, negando el 50 postulado, pero no llegó a contradicción alguna y optó por no dar a publicidad los extraños resultados que obtuvo.

En 1832 se publica la obra de Johann Bolyai (1802-1860), matemático húngaro, que a los veintiún años concibió la nueva geometría y que fuera avalada por Gauss porque los resultados eran coincidentes con los que él no quiso publicar.

De esa misma época son los trabajos del matemático ruso Nikolai Lobatschewski (1793-1856), presentados en 1826 en la universidad de Kazán, bajo la denominación de "geometría imaginaria". Esta geometría hiperbólica la concibió negando el 50 postulado de Euclides, admitiendo que por un punto exterior a una recta pasa más de una paralela a ella.

Tiempo después, en 1854, el matemático alemán Bernhard Riemann (1826-1866) construyó un tipo de geometría no euclídea, la geometría elíptica, de acuerdo con la hipótesis del ángulo obtuso, admitiendo que por un punto exterior a una recta no pasa ninguna paralela a ella.

Más tarde, Einstein utilizaría esta geometría como marco geométrico de la teoría de la relatividad general.

Todos estos desarrollos negaban el 50 postulado, pero sin derivarse ninguna contradicción. Todo lo contrario, se obtenían una serie de afirmaciones cuyo conjunto constituiría las GNE (Geometría no euclidiana).

A los desarrollos de la GNE debe agregarse la Teoría de los Conjuntos del filósofo y matemático ruso Georg Cantor, que influyó en toda la matemática posterior y tiene una importancia fundamental en la construcción axiomática. Las obras principales de Cantor datan de 1883 y dos volúmenes editados en 1885-1897.

A partir de las GNE, nacen los **Sistemas Axiomático-Formales** que se diferencian del sistema euclidiano aristotélico en que, mientras en éste se partía de axiomas o nociones comunes autoevidentes y generales y de proposiciones referidas a los objetos matemáticos (postulados o hipótesis), en los sistemas axiomático-formales se parte de axiomas que ya no son verdades impuestas para todos como principios indemostrables, sino enunciados que no afirman ni niegan la existencia de los términos que los integran.

No obstante, debe admitirse que siguen vigentes los otros cuatro postulados de Euclides, pasando a llamarse **términos primitivos** aquellos que eran integrantes de los otrora principios indemostrables.

En las GNE no importa el significado de los términos sino la **forma de postularlos**. Por lo tanto, esta geometría consiste en hacer deducciones a partir de proposiciones cuya forma se conoce, pero donde no importa su sentido.

La vinculación de los Sistemas Axiomático-Formales con la realidad, se establece elaborando un **diccionario** llamado **interpretación** del SAF y que consiste en asignarle a cada uno de los términos primitivos un significado. A su vez, al atribuirle significa-

do a los términos, transformando a los axiomas en verdaderos, se constituye un **modelo** del sistema.

Los SAF son, pues, esqueletos de investigación y pueden aplicarse a distintos temas. Una vez dada la interpretación queda por ver, científicamente, a través de la comprobación empírica, si ésta es adecuada. La interpretación sobre un modelo físico transforma un SAF en un sistema **hipotético-deductivo**, que es el método standard, mencionado en un párrafo anterior.

Está claro, entonces, que un mismo SAF puede tener varios modelos adaptables a diversas investigaciones.

El Modelo Axiomático Formal parte de la deducción y luego busca establecer las verdades mediante la interpretación, en tanto el método aristotélico vigente hasta entrado el siglo XIX, proponía partir de verdades evidentes y deducir desde allí.

Respecto a las GNE, son también modelo geométrico de la mecánica cuántica, que interpreta la configuración electrónica de los átomos y su vinculación con las propiedades de los elementos y compuestos que constituyen la materia.

El matemático alemán, nacido en Lituania, Hermann Minkowski (1869-1909), fue profesor en la Escuela Politécnica de Zurich y tuvo como alumno a Albert Einstein. Trabajó en la teoría de los números e introdujo en ella conceptos geométricos. **A él se debe el espacio tetradimensional de la Relatividad Restringida.**

En este espacio, donde a las tres dimensiones o coordenadas (x, y, z) se agrega el tiempo t, los puntos son

acontecimientos, de manera que el movimiento de una partícula material corresponde a una curva que es el lugar geométrico de los acontecimientos constituidos por el paso de la partícula por puntos dados del espacio ordinario en instantes dados.

La teoría de la relatividad restringida o especial, surge como consecuencia de algunas divergencias de la física clásica con la ecuaciones de Maxwell, leyes fundamentales del electromagnetismo. Como la leyes de la física son invariantes para todo cambio de sistema de referencia inercial, que se describen en mecánica clásica según las transformaciones de Galileo, basadas en lo que luego sería el postulado newtoniano de una única escala de tiempo, al contrastar con las ecuaciones de Maxwell quedó de manifiesto que el tiempo empleado por la luz en recorrer un trayecto determinado cualquiera es independiente de la orientación de la trayectoria luminosa con respecto a la trayectoria terrestre, contradiciendo los resultados previsible a partir de las transformaciones de Galileo.

Los cambios de sistema inercial se representan mediante las matrices ortogonales del espacio de Minkowski, llamadas *transformaciones de Lorentz*, que corrigen la forma del grupo de Galileo.

De aquí derivan la *contracción de Lorentz* de la longitud y la *dilatación* de los tiempos, además de que la masa relativista crece con la velocidad tendiendo a infinito cuando ésta tiende a la velocidad de la luz, cuyas ecuaciones se explican aparte.

En la **Teoría de la Relatividad General** o Teoría relativista de la gravitación, Einstein supera la teoría

clásica newtoniana del campo gravitatorio. En la relatividad general, el espacio-tiempo es una variedad curva de cuatro dimensiones que obedece a la geometría de Riemann.

En este espacio, a cada sistema de referencia le corresponde un sistema de coordenadas curvilíneas.

Esta teoría ha permitido predecir con éxito algunos fenómenos astronómicos que se apartan de la teoría newtoniana de la gravitación, entre ellos, el desplazamiento del perihelio de Mercurio, la desviación experimentada por los rayos luminosos que pasan cerca del sol y el efecto rojo gravitatorio.

Una de las consecuencias más relevantes de la teoría de la relatividad general es la interdependencia entre la física y la geometría : la inercia de la materia impide al Universo obedecer las leyes euclidianas y le confiere una geometría de Riemann.

ANEXO

Postulados de la geometría euclidiana

- 1º) "Es posible trazar una línea recta desde un punto cualquiera a otro."
- 2º) "Es posible prolongar continuamente en línea recta una recta limitada."
- 3º) "Es posible trazar un círculo con cualquier centro y distancia (radio)."
- 4º) "Todos los ángulos rectos son iguales entre si."
- 5º) "Por un punto exterior a una recta se puede trazar una sola paralela a ella."

Ecuaciones de la teoría de la relatividad especial

Contracción de Lorentz de la longitud

$L = L_0 (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, siendo L_0 longitud en reposo (por ejemplo, de una barra), L longitud a velocidad v y c la velocidad de la luz.

L tiende a cero cuando v tiende a c , es decir $\lim_{v \rightarrow c} L = 0$

Dilatación de los tiempos

El intervalo temporal entre dos acontecimientos es menor en un sistema inercial en el que ambos ocurran en el mismo punto que en otro sistema en movimiento rectilíneo uniforme respecto al primero.

Si consideramos dos sistemas de referencia donde dos de las coordenadas son respectivamente paralelas, mientras la tercera se desliza sobre el eje x con velocidad v , resultará :

$$t = \frac{t_0}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}$$

de aquí se deduce que el tiempo en el sistema que se desliza con velocidad v tiende a infinito cuando v tiende a c .

$$\lim_{v \rightarrow c} t = \infty$$

Si $v = 0$ resulta $t = t_0$

Ecuación fundamental de la mecánica relativista

$$F = \frac{d(m_0 v)}{dt (1 - v^2/c^2)^{1/2}}$$

siendo m_0 la masa en reposo del móvil, F la fuerza actuante, v la velocidad del móvil y c la velocidad de la luz.

Ecuación de la masa relativista

$$m_i = \frac{m_0 \cdot c}{(c^2 - v^2)^{1/2}}$$

siendo m_0 la masa en reposo, v la velocidad del móvil c la velocidad de la luz y m_i la masa inercial o relativa

Cuando v tiende a c la masa inercial tiende a infinito: $\lim_{v \rightarrow c} m_i = \infty$

Energía de la partícula libre

Esta energía no se anula cuando $v = 0$, sino que tiene el valor finito :

$$E = m_0 \cdot c^2$$

lo que muestra que la masa es una forma de energía y que, recíprocamente, la energía posee una inercia.

NOTA : De acuerdo a una de las leyes de Newton **la masa es la relación constante** entre la fuerza aplicada y la aceleración que adquiere un cuerpo o partícula material.

$$m = \frac{F}{a}$$

Compárese con la ecuación de la masa relativista que varía con la velocidad. Esto es lo que Kuhn y Feyerabend denominan *incommensurabilidad de los términos entre paradigmas*.

Contextos

Contexto de descubrimiento

Como habíamos anticipado en la Unidad Temática 1 "Epistemología -

Ciencia revolucionaria", interesaban en la producción del conocimiento científico estudiar la estructura y validez de las teorías científicas.

Además se anticipó que a tal fin era preciso dividir el estudio en tres campos contextuales : el de descubrimiento, el de justificación y el de aplicación.

Para analizar el primero de ellos, refiriéndonos a la teoría de la relatividad, debemos situarnos en los hechos o fenómenos que presentaban desviaciones respecto a las teorías predominantes en el siglo XIX.

En la física clásica la mecánica newtoniana tenía hasta entonces un éxito muy grande, pero tras la formulación de las ecuaciones de Maxwell, que se constituyeron en las leyes del electromagnetismo, se demostró que no se sostenía el principio newtoniano de unicidad del tiempo, para todos los sistemas inerciales.

Hacia finales de ese siglo se intentaba conservar la física clásica, pero ese esfuerzo se derrumbó con la experiencia de Michelson y Morley donde quedó de manifiesto que el tiempo empleado por la luz en recorrer un trayecto determinado era independiente de la orientación de la trayectoria luminosa con respecto a la trayectoria terrestre, en contradicción con los resultados previsibles a partir de las transformaciones de Galileo.

Otras desviaciones detectadas en fenómenos astronómicos donde se verificaban apartamientos de lo previsto basándose en la teoría newtoniana de la gravitación y que fueron solucionados a partir de la formulación de la teoría de la relatividad general, eran,

entre otros, el desplazamiento del perihelio de la órbita de Mercurio, la desviación experimentada por los rayos luminosos que pasan cerca del sol y el efecto rojo gravitatorio.

Es decir, las teorías revolucionarias como es el caso de las tratadas y que debemos a Albert Einstein, surgen como una necesidad de la ciencia ante la acumulación de fenómenos no justificados por las teorías predominantes. En otras palabras, existe un período donde se ponen en duda las bases científicas por la proliferación de desviaciones respecto a ellas.

El extraordinario mérito del científico revolucionario es plantearse los apartamientos fenomenológicos con sentido heurístico y encontrar la justificación de los mismos formulando el nuevo modelo que se pueda comprobar empíricamente.

Contexto de justificación

Anticipamos en la Unidad Temática 2 : "Las Geometrías No Euclidianas - Los Sistemas Axiomático-Formales", que en la matemática se había producido una ruptura epistemológica de carácter revolucionario a mediados del siglo XIX, al crearse las GNE.

Presentadas entre 1826 y 1832 por Bolyai y Lobatchewski la geometría hiperbólica y en 1854 la geometría elíptica de Riemann, la corriente formalista en la matemática creció y produjo los Sistemas Axiomático-Formales (SAF) de la llamada Matemática Pura. También se mencionó que para la construcción de los axiomas contribuyó fundamentalmente la Teoría de Conjuntos de Georg Cantor.

Esos SAF se encuentran con la realidad a través de su aplicación al estudio de fenómenos, para lo cual se requiere un diccionario que dé significado a los términos y, por lo tanto, una interpretación que deriva en un modelo físico. Este es el campo de la llamada Matemática Aplicada.

Se mencionó que Einstein fue alumno del matemático Minkowski en el Politécnico de Zurich quien ideó un sistema de matrices ortogonales y concibió el espacio cuatridimensional que derivó en las transformaciones de Lorentz que se encuentran en Anexo para su análisis y que reemplazaron a las correspondientes transformaciones de Galileo de la física clásica.

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico holandés que inició el estudio de las transformaciones de las coordenadas espacio-tiempo y a él se debe la base de la teoría de la relatividad, se destacó en el campo de la física atómica y fue premio Nóbel de física en 1902.

También tuvo una participación destacada en el desarrollo de la relatividad general el astrofísico alemán Karl Schwarzschild (1873-1916), quien introdujo en astronomía el método estadístico (fotometría). Le cupo resolver alguno de los tensores de Riemann del espacio-tiempo estando en trinchera de guerra. Afortunadamente logró enviar sus resultados antes de morir en batalla y se verificó en sus cálculos una anticipación a la existencia de los agujeros negros.

De estas consideraciones se infiere que los físicos y matemáticos contemporáneos de Einstein, contribuyeron para que éste pudiera construir las teorías relativistas que produjeron

el cambio de paradigma que alumbró el siglo XX y la consiguiente explosión de conocimientos que aún gozamos y sufrimos.

Particularmente, la geometría de Riemann, el espacio tetradimensional de Minkowski y las transformaciones de Lorentz, son las principales bases matemáticas, justificativas de las teorías relativistas.

Contexto de aplicación

La revolucionaria teoría de la relatividad dio explicación a las desviaciones de la física clásica respecto al electromagnetismo, como así también a los fenómenos astronómicos tales como el desplazamiento del perihelio de Mercurio, la desviación de los rayos de luz que pasan cerca del sol y el corrimiento al rojo gravitatorio, además que se adecuó a dar solución a muchos otros problemas astrofísicos o macrocósmicos.

Su éxito fue incuestionable, incluso porque Paul Dirac en 1928, vinculó con éxito aspectos de la teoría de la relatividad con la mecánica cuántica que tendía a dar solución a la teoría atómica del ámbito microcósmico. Se llamó mecánica cuántica relativista.

Pero donde más validez adquirió para la física, es donde tuvo más implicancias nefastas para la vida de los seres humanos. Fue en la inauguración de la Era Nuclear.

En la Europa amenazada por Adolf Hitler muchos científicos de origen judío o con vinculaciones familiares de ese origen, emigraron a los Estados Unidos. Entre otros Albert Einstein, Enrico Fermi, Klaus Fuchs, Leo Szilard.

El físico húngaro de origen judío Leo Szilard, fue quien convenció a Albert Einstein de que enviara una carta al presidente Roosevelt en 1939, recomendándole acelerar las investigaciones para contar antes que los alemanes con un arma de destrucción masiva : la bomba atómica de fisión nuclear.

El presidente Roosevelt puso al General Leslie Groves a cargo del Proyecto Manhattan, quien a su vez designó a Robert Oppenheimer al frente de un gran equipo de científicos y colaboradores.

El desarrollo fue exitoso, se probó en Los Alamos el 16 de julio de 1945, pero los líderes de 1939 habían cambiado.

Ya en 1943 los alemanes, que comenzaban el repliegue del frente ruso, habían decidido pasar el desarrollo de la bomba atómica al ámbito privado, quitándolo de las prioridades de guerra.

El presidente Roosevelt falleció a fines de 1944 de un derrame cerebral, Hitler se suicidó pocos días antes de la caída de Alemania en mayo de 1945 y el único país belicista ya muy maltrecho, que quedaba en pie, era Japón.

En Lugar de Roosevelt, quedó a cargo de la presidencia el Vicepresidente Harry Truman. El objetivo del desarrollo había sido anticiparse al monstruo Hitler, pero éste y Alemania habían dejado de ser un peligro.

Truman consultó con los dos Generales más sobresalientes : Dwight Eisenhower que había triunfado en Europa junto a los aliados y provocado la rendición del eje Berlín-Roma y el

General Douglas Mc Arthur que no había podido derrotar a los japoneses en el pacífico. El primero se declaró en contra de emplear la bomba atómica contra Japón porque éste país estaba aislado y cerca de la inanición. En cambio Mc Arthur logró convencer a Truman de que podrían llegar a morir unos 500.000 norteamericanos en la ocupación de Japón.

Esta hipotética cantidad de muertos u otra razón, fue la que decidió al presidente a arrojar las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki (en este caso en lugar de la ciudad de Kokura por razones climáticas).

Pocas semanas antes, Estados Unidos, Inglaterra y Francia reunidos en Postdam, deciden enviarle un ultimátum a Japón para que se rinda sin condiciones. Los japoneses deciden esperar la decisión de la Unión Soviética, que no estaba en guerra con Japón, para que oficie de intermediaria.

La Unión Soviética responde declarando la guerra a Japón atacando las posiciones japonesas en Manchuria.

Es decir, que Japón tenía escasas posibilidades de hacer frente a los aliados con armamentos convencionales, estando aislado y con su economía maltrecha. Pero, se prefirió dar un escarmiento ejemplar al último miembro del trío enemigo beligerante. Y así se inició la era nuclear.

Terminada la segunda guerra mundial, comenzó la guerra fría entre occidente y la Unión Soviética. Uno de los participantes del proyecto Manhattan, Klaus Fuchs, junto a otros cómplices, se encargaron de pasarle los secretos atómicos a los soviéticos. Estos hicieron explotar en Siberia, el 28 de agosto de 1949, su primer artefacto de fisión nuclear, tan sólo tres años después de la primera explosión.

Poco tardaron ambos contendientes en desarrollar un arma aún más poderosa : la Bomba H o de Hidróge-

no, miles de veces más poderosa que la pequeña bomba arrojada sobre Japón.

Después desarrollaron los vectores misilísticos capaces de transportar cabezas nucleares a cualquier lugar del planeta, alcanzando un poder destructor de hasta veinte veces el planeta tierra.

Después un sistema de defensa antimisilístico para hacer estallar los artefactos antes de que lleguen a sus blancos.

...Y así comenzó el equilibrio del terror entre las superpotencias.

Y así comenzó la vigilia de esperar que algún general pakistaní o hindú o norcoreano, algún ayatollah iraní, algún terrorista musulmán tipo Bin Laden, algún neonazi o individuo desequilibrado o supuestamente equilibrado, se le ocurra hacer estallar artefactos nucleares en cualquier parte del mundo. Es un inquietante final abierto e impredecible.