



**CONSEJO ARGENTINO PARA LAS  
RELACIONES INTERNACIONALES**

**COMITÉ DE ASUNTOS NUCLEARES**

**COMENTARIOS SOBRE INVESTIGACIONES FÍSICAS  
DE DOBLE FILO Y LAS SACUDIDAS DEL  
ORDENAMIENTO NUCLEAR INTERNACIONAL**

Fausto T. Gratton

**14 DE MAYO DE 2007**

# COMENTARIOS SOBRE INVESTIGACIONES FÍSICAS DE DOBLE FILO Y LAS SACUDIDAS DEL ORDENAMIENTO NUCLEAR INTERNACIONAL

Fausto T. Gratton

Investigador Superior del CONICET y miembro de número de la  
Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

Agradezco al Embajador Oscar Fernández, Presidente del Comité de Asuntos Nucleares del CARI la distinción que me otorga al invitarme a presentar este informe, y con su venia dedico estos comentarios a la memoria de mi mentor Dr. Vittorio Nardi fallecido en 2001 por mal incurable, quien me introdujo a la física de los plasmas densos y me informó de muchas ideas que se investigaban en Los Alamos, y la del querido amigo Ing. Dr. Manfred Heindler prematuramente desaparecido por enfermedad incurable en 2006, quien me abrió los ojos sobre los problemas de la factibilidad tecnológica y económica de los proyectos de reactores de fusión.

## 1. Palabras preliminares y plan del informe <sup>[\*]</sup>

A comienzos de 2000 la sombra de Chernobyl seguía pesando negativamente en la opinión pública y en muchos países avanzados no era popular hablar de energía nuclear. EEUU, país en la vanguardia económica y tecnológica de occidente, no había comisionado nuevos reactores de potencia desde hacía más de dos décadas.

Hoy la energía nuclear está nuevamente en marcha. China encabeza la carrera hacia la energía nuclear, Beijing anuncia que va a construir 30 reactores nucleares de aquí a 2020, una inversión de 50,000 millones de dólares. Comoción en todos los grandes productores, Siemens, Alstrom, General Electric, Areva. En Enero de 2007 el gigante Japonés – Americano Westinghouse (Toyota) se lleva un contrato por 5,300 millones de dólares para instalar cuatro reactores en China. <sup>[1]</sup>

También se ha comenzado a poner en evidencia el debate que divide el frente ecologista. Hay quienes se han dado cuenta de que la opción nuclear es inevitable, si se quiere realmente sostener una posición coherente en el problema del calentamiento global. Otros denuncian a los que han comenzado a reexaminar seriamente la cuestión como renegados y traidores.

Considerando la cadena completa de la operación, desde la extracción de los recursos hasta la disposición final de los desechos – incluida la construcción del reactor– la opción nuclear representa una emisión de material de efecto invernadero un centenar de veces menor que lo que se emite por combustión de carbón, petróleo y gas natural. Frente a los dramáticos llamados de atención en la conferencia ONU del 29 de enero de 2007 sobre Cambio Climático en París, y los últimos informes ONU sobre el mismo tema, cabría esperar que se pueda hacer finalmente un discurso racional sobre energía nuclear.

Por suerte y con gran beneplácito hemos asistido también a la reactivación de la actividad nuclear en Argentina. En momentos difíciles este Comité ha acompañado la defensa de la recuperación de la tecnología nuclear de nuestro país.

Paso a definir el objetivo de mi exposición. La física nuclear y la física de plasmas en vista de sus aplicaciones para la producción de energía han sido desde el comienzo instrumentos de doble filo. Investigación y desarrollo apuntan hacia el empleo pacífico de la energía mediante los reactores, pero el conocimiento que se adquiere y los resultados de las aplicaciones pueden ser empleados en el ámbito militar. Me voy a referir principalmente, aunque no exclusivamente, a hechos e investigaciones de física de la fusión nuclear, área en la cual tengo alguna competencia por mi especialidad científica que es la física del plasma.

Sin embargo para el Comité de Asuntos Nucleares el aspecto científico es sólo una parte del problema, y el interés del CARI por los aspectos técnicos llega sólo hasta cierto punto. El foco de su atención está centrado en los problemas internacionales y el “*statu quo*” en las distintas áreas de importancia estratégica. Por eso, mi cuadro del tema fusión se limitará a trazos informativos de carácter general. En cambio, en la segunda parte de la disertación trataré de ubicar esos temas en la perspectiva más amplia e inquietante de algunos eventos recientes. Comentaré algunos sucesos que han sacudido el ordenamiento nuclear internacional.

En esa parte del discurso no podré exhibir ante ustedes ninguna credencial especial. Es tan solo la preocupación de un ciudadano más que observa azorado como va el mundo, con información de la prensa internacional y algunas publicaciones de institutos especializados. Soy un lego en estas materias y corro el riesgo que se diga “*zapatero a tus zapatos*”. Pero mi propósito no va más allá de poner algunos temas en la agenda de esta mesa, a fin de que podamos escuchar la contribución esclarecedora de muchos expertos hoy presentes en la rueda de discusión sucesiva, según la modalidad de estas reuniones.

El Embajador Oscar Fernández me pidió que cierre con alguna reflexión de carácter histórico. Gran bondad la suya que me concede tanto crédito. Estoy seguro de que mis conocimientos son flacos para satisfacer sus expectativas pero me esforzaré por complacerlo.

## **2. Fisión y Fusión**

### Comentarios sobre Fisión

En agosto de 2006 el Comité ha tenido el privilegio de escuchar la presentación del Lic. Jinchuk, un muy elogiado estado de la situación nuclear en Medio Oriente. Como introducción a su exposición el Lic. Jinchuk ha hecho también un repaso sobre fisión, con detalles técnicos y esquemas gráficos. En consecuencia, yo asumo ese punto de partida.

La misma física que gobierna un reactor a uranio enriquecido, enseña también como realizar una bomba con  $^{235}\text{U}$ , es decir con uranio altamente enriquecido, digamos hasta un 80% [2]. Como muchos saben (y lo ha recordado el Lic. Jinchuck en su informe) con un disparador simple, no más complicado que el principio de funcionamiento de una pistola o cañoncito (“*gun device*”) y menos de 100 kg de uranio, tal vez hasta con 40 kg, dependiendo del grado de enriquecimiento, se puede construir una bomba equivalente a la que arrasó la ciudad de Hiroshima en 1945.

Por otra parte, si se dispone de Plutonio, obtenido por el reprocesamiento de combustible gastado en reactores nucleares, se puede construir una bomba mucho más potente, como la que destruyó Nagasaki, pocos días después [3] Pero esto es más difícil, no solo por el problema de conseguir (y manejar) el Plutonio sino porque el detonador que producirá la concentración del material en la masa crítica es más sofisticado y requiere conocimientos de tecnología de focalización de explosivos. El método de implosión requiere resolver un problema crucial y difícil de ingeniería especializada.

Naturalmente, cuando se trata de un Estado que desea utilizar el arma como instrumento de agresión o disuasión, ha de tener bien probado el vector de transporte, los misiles adecuados. Ello significa haber alcanzado capacidad tecnológica en el área de investigaciones y desarrollos propios de la aeronáutica espacial. Todos estos temas están interconectados.

Como dijimos, se han producido novedades, tanto en la física cuanto en la ingeniería de nuevos diseños de reactores. Este Comité, muy acertadamente, ha planeado otros encuentros con expertos argentinos en esos temas, y yo dejo la fisión en manos de los profesionales competentes.

Me limito a destacar que recientemente ha aumentado significativamente en la percepción de expertos e ingenieros nucleares del ámbito internacional la alarma y la urgencia de acelerar lo más posible el desarrollo del plan de dilución a menores concentraciones de las existencias de  $^{235}\text{U}$ . Es decir el pasaje de HEU (*High Enriched Uranium*, >20% de  $^{235}\text{U}$ ) a LEU (*Low Enriched Uranium* <20% de  $^{235}\text{U}$ ), y el aumento de controles y seguridad de los depósitos de HEU. Esto es debido a la creciente amenaza del terrorismo, principalmente el de origen musulmán. Como todos saben, este tipo de terrorismo emplea una cobertura de religiosidad islámica para lograr sus objetivos, que son la captación de prosélitos entre las grandes masas de países musulmanes y en las comunidades de emigrados en países de occidente.

Hay que recordar que *Little Boy*, el artefacto de horror que barrió Hiroshima, no tuvo ensayos previos, tan seguros estaban proyectistas y constructores del eficaz funcionamiento del mecanismo de encendido. Por lo tanto, supongamos que un grupo terrorista consiga comprar o robar, o que tal vez un país malintencionado -por ejemplo un "estado canalla"- les regale en gran secreto unos 50 kg de Uranio altamente enriquecido. Que consigan además un modesto asesoramiento técnico. Que transporten dicho uranio vía marítima y/o terrestre y logren introducirlo de contrabando en algún país, sea del Este o del Oeste. Que lo lleven a alguna ciudad donde tengan un sótano en el cual armar su infernal abominación.

Con estas premisas, todos ven que se produciría un desastre de proporciones gigantescas, que puede abatir las bases de convivencia de cualquier nación, y derivar en consecuencias incalculables para las comunidades civilizadas del resto del mundo. Sugiero que el Comité considere una invitación al Ing. Abel González, quien por su larga experiencia en altos cargos del OIEA está muy calificado para trazar un cuadro de situación del complejo problema del terrorismo nuclear.

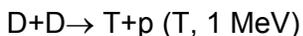
## Nociones sobre Fusión

Utilizando la fusión inducida (en naturaleza, la fusión ocurre espontáneamente sólo en el interior de las estrellas) de núcleos de elementos livianos, se puede concebir un uso pacífico de esa energía en reactores de fusión controlada basados en las reacciones D+D, o D+T (D: deuterio, T: tritio). A 60 años de la prueba de factibilidad explosiva (no controlada), los reactores de fusión controlada siguen siendo una promesa no cumplida, y a mi criterio esto seguirá así por muchas décadas más. Daré luego algunas de las razones de esta situación paradójica. Por otra parte la fusión en la modalidad inercial (no controlada) por compresión y calentamiento rápidos del plasma, aunque no muy promisorio para la producción de energía, da lugar a investigaciones de física aplicada de vanguardia.

Pero el conocimiento y experiencia que en estas áreas se adquiere, pasa muy cerca del territorio propio de la física del arma nuclear más potente, me refiero a la llamada bomba de hidrógeno, o bomba-H, que funciona sobre la base de la reacción D+T, con la regeneración de T mediante Li (litio).

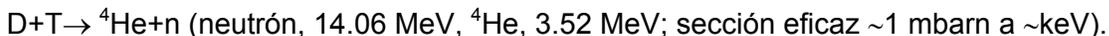
Para esta arma se requiere un detonador muy energético, el encendido se realiza con una bomba nuclear de fisión. Pero requiere también una sofisticada contención de la radiación producida en la explosión inicial. Ello ocurre en el denominado *holraum*, o cámara de radiación. El holraum está rodeado por paredes con elementos de alto Z (número de carga eléctrica del núcleo) que luego de ser excitados decaen, inyectando rayos X sobre la materia apta para fusionar. Después de la II guerra mundial los mejores cerebros de los EEUU tardaron varios años en darse cuenta de la idea crucial que permitiría la producción de la superbomba, hasta que concibieron el mecanismo denominado de Teller-Ulam basado precisamente en el holraum. Los procesos de transporte en una mezcla de plasma y radiación de alta energía y densidad constituyen uno de los aspectos más difíciles, y menos conocidos de la física del plasma. El desencadenamiento de energía resultante en la bomba-H, como se sabe, es muy superior al dispositivo de fisión, por factores que llegan a una multiplicación energética  $\approx 1000$ .

Las reacciones de fusión más fáciles de lograr en laboratorio, y potencialmente factibles en un futuro reactor de fusión, son las siguientes. Por un lado tenemos D+D, con dos canales de casi igual probabilidad



El deuterio es un isótopo minoritario del H, abundante en una proporción de 1 sobre 6760 hidrógenos en el agua de todos los mares del mundo, formando parte de la fracción que se denomina *agua pesada*. Pero la temperatura, o energía media, de trabajo para que esta reacción sea significativa es muy alta y difícil de alcanzar en laboratorio.

Por otro lado, existe una reacción más accesible, con menor energía de trabajo que la anterior,



La tasa de la última reacción citada, D+T, es unas 100 veces mayor que la reacción D+D a la misma temperatura.

Pero el T decae con relativa rapidez <sup>[5]</sup> y no existe en naturaleza, su producción es necesariamente artificial. Para empezar hay que proveer el T a partir de los neutrones de un reactor de fisión. Luego, para sostener el proceso, hay que regenerar el T mediante blancos de <sup>6</sup>Li, el cual existe en proporción de 7.5% por átomo de Li natural. Una reacción que interesa es  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4.8 \text{ MeV}$ , con relativamente buenas secciones eficaces para  $n$  de 14 MeV, y 945 barn para  $n$  térmico.

La reacción con el isótopo más abundante en naturaleza, <sup>7</sup>Li no ocurre porque es endoérgica, a menos que el  $n$  incidente tenga más de 2.5 MeV y entonces da  ${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + n'$ . Pero para el propósito mencionado se considera habitualmente la reacción con <sup>6</sup>Li. De todos modos, puesto que el proceso no se realiza con 100% de eficiencia, hay que pensar en el empleo de reacciones auxiliares del tipo  $A + n \rightarrow A' + 2n$ , que multiplican el número de neutrones. Por ejemplo se considera la reacción  ${}^9\text{Be} + n \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 2n$ , pero para  $n$  de 14 MeV existen también otras posibilidades. Como vemos se pasa por territorios muy cercanos a los de la física de la bomba-H.

Más aún, en la bomba de fisión se emplea generalmente un combustible nuclear híbrido basado en la combinación D+T para potenciar la explosión, en el método llamado *boosting*. En el boosting se usan reacciones de fusión como fuentes de neutrones adicionales para reforzar el flujo de neutrones que se genera cuando la cadena de reacciones fisión opera sola. Con la inclusión de deuterio y tritio en el núcleo del material fisionable se consigue un mayor rendimiento energético a igual cantidad de material de fisión, o bien se alcanza el mismo rendimiento con menor gasto de material de fisión.

Armas de gran rendimiento energético incluyen *litio deuterado* y material fisionable (uranio <sup>235</sup>U y <sup>238</sup>U) en una tercera etapa. Los límites prácticos son el tamaño y el peso del arma por el problema del transporte. Las más grandes bombas de EEUU son de 10 a 20 Megatonnes<sup>[6]</sup>, aunque se siguen diseñando variedades más livianas y más pequeñas en una búsqueda de optimización para obtener mejores rendimientos energéticos por peso y/o mejores rendimientos energéticos por volumen. En estos proyectos secretos tiene gran importancia la posibilidad de la micro-experimentación de ciertos mecanismos, y efectos físicos, en laboratorio para validar cuestiones previstas por vía teórica, o para medir ciertos parámetros. Asimismo es de gran valor la realización de detalladas simulaciones numéricas de la explosión mediante códigos gigantes en supercomputadoras.

### **3. La generación de energía por fusión para uso pacífico.**

#### La evolución de los experimentos

Durante un buen lapso de tiempo, desde la II guerra mundial hasta 1958, las investigaciones en fusión nuclear para la producción de energía se desarrollaron en secreto. En la conferencia internacional de Ginebra de ese año los países de Occidente y la Unión Soviética acordaron levantar el secreto, compartir el conocimiento adquirido, y llevar a cabo programas de colaboración en física del plasma, y confinamiento magnético del plasma, para explorar la factibilidad del uso pacífico de la nueva fuente de energía. Se constató entonces que la Unión Soviética, los EEUU y el UK habían llegado en forma independiente a niveles similares de progreso en esa rama de la física.

A fines de la década de 1960 los Soviéticos anunciaron haber alcanzado un plasma de alta temperatura, alrededor de 300 eV en el *tokamak*, una máquina de confinamiento magnético toroidal, en el cual el plasma se mantiene en un equilibrio aproximadamente estable, tanto mediante un campo magnético externo en forma de rosquilla, cuanto por un campo magnético propio debido a intensas corrientes eléctricas, que se hacen pasar por el mismo plasma empleando un principio electromagnético similar al de los transformadores. Desde su invención el tokamak cobró cada vez mayor importancia, y terminó por convertirse en el eje central de las investigaciones de plasmas para la fusión, aunque varias otras alternativas y otros métodos fueron también activamente investigados durante las dos décadas siguientes.

Fusión inercial, en cambio, significa que no hay confinamiento real sino retención transitoria, en la cual el plasma que va a fusionar es parcialmente contenido por la inercia de un tapón pesado. O bien, el plasma a fusionar es rápidamente comprimido por un “*driver*” (forzante) electromagnético o por una detonación (que actúa como *yesca* o encendido) para lo cual existen distintos sistemas. El confinamiento dura tanto cuanto tarda la inercia a permitir la expansión después de que se desarrollan las reacciones nucleares en el plasma.

Las investigaciones en confinamiento inercial se realizaron desde el principio de la década de 1960, a partir de la invención del *laser*. Los esfuerzos iniciales se concentraron en proyectos, que en ese entonces eran secretos, en los cuales un pulso laser de gran energía era empleado para producir la implosión y calentamiento del plasma a temperaturas a las que se creía podrían ser adecuadas para producir abundante fusión nuclear.

Recuerdo que, ignorando los proyectos secretos en curso, el Dr. A. Caruso (un colega que llegaría a liderar el experimento italiano de fusión con láser) y yo, publicamos uno de los primeros trabajos del tema en *Nuclear Fusion*, una revista científica del OIEA, en 1964. Más tarde supimos que nuestras ideas eran ya conocidas en EEUU y en la URSS, donde en ese momento se estaba trabajando secretamente sobre conceptos más sofisticados.

El secreto sobre algunos aspectos de las investigaciones de fusión inercial fue levantado durante la década de 1970. Pero el elemento clave de los experimentos, los detalles del diseño de los blancos, o sea los *pellets* para la fusión, sigue siendo información secreta. Pellet se podría traducir en español como píldora, bolita, o tal vez perdigón.

El complejo trabajo de optimización del diseño de pellets adecuados aún continúa. Mientras tanto se han logrado grandes progresos en el desarrollo de los *drivers*, o sea los causantes del proceso de implosión, mediante pulsos ultracortos de alta energía con los cuales se ha obtenido la implosión de píldoras de un milímetro de radio. Los *drivers* pueden ser tanto láseres de alta potencia, cuanto aceleradores de haces de iones livianos, o de electrones, de alta energía. Se han desarrollado láseres que producen más de 0.1 Mjoules en pulsos de  $\approx 1$  nanosegundo ( $10^{-9}$  s) y las potencias alcanzadas en pulsos muy cortos exceden 1 kwatt. Las estimaciones científicas de los requerimientos necesarios para alcanzar la energía de fusión por confinamiento inercial indican que el *driver*, sea del tipo láser, sea del tipo haz de partículas, debe tener una energía entre 5 y 10 Mjoules, y tener la capacidad para descargar más de un kwatt de potencia sobre un minúsculo blanco de D-T.

### Fusión por confinamiento magnético

Los plasmas confinados por campo magnético deben ser calentados hasta alcanzar temperaturas en las cuales las reacciones nucleares sean significativas, lo cual significa

energías térmicas mayores de 4.4 keV (o sea unos 75 millones de grados K). Para ello existen varios métodos, aunque cada uno si bien posee ciertas ventajas adolece en cambio de ciertos inconvenientes. Se puede energizar el plasma mediante el acoplamiento de ondas de radiofrecuencia con las partículas que forman el plasma. Se recurre también a la inyección de haces de partículas neutras de alta energía, los cuales atraviesan el campo magnético, entran en la cámara de fusión, se ionizan, quedan atrapados y calientan el plasma. Se utiliza asimismo el principio del calentamiento resistivo, o calentamiento Joule, mediante la disipación de corrientes eléctricas inducidas en el plasma, y se ha experimentado también extensivamente con la compresión magnética del plasma.

### Fusión por confinamiento inercial (ICF)

En esta modalidad la bolita de material apto para la fusión se comprime muy rápidamente hasta densidades  $10^3 - 10^4$  veces mayores que la densidad normal, estado en el que se generan presiones del orden de  $10^{12}$  atmósferas por brevísimos períodos, del orden de nanosegundos. Si el producto de la masa por el volumen del combustible de fusión comprimido es suficientemente grande, se consigue generar suficiente energía por fusión antes de que el plasma se expanda y se disperse. Cuando las condiciones físicas son adecuadas, en principio es posible que se libere más energía de fusión que la que se necesita para comprimir y calentar el plasma.

El proceso físico de la ICF guarda alguna analogía con el que se desarrolla en las armas de fusión nuclear, y también con el que ocurre durante la formación de las estrellas. En este último caso hay colapso gravitacional de la materia, básicamente hidrógeno, compresión, calentamiento, y el encendido de la cadena de reacciones de fusión nuclear. En una estrella el proceso alcanza un estado de equilibrio a alta temperatura y densidad, confinado por acción de la gravedad. En cambio, tanto en la ICF cuanto en la bomba-H, luego de la compresión, se produce finalmente la dispersión total del combustible.

### Las condiciones para un balance energético positivo del reactor de fusión

Se puede obtener una ecuación que vincula el producto  $n\tau$ , de la densidad  $n$  por el tiempo de confinamiento de la energía  $\tau$ , con una función de la temperatura, que es distinta según el tipo de reacción de fusión que se considera (criterio de Lawson). En el caso de un plasma de D-T el valor mínimo de  $n\tau$  requerido para tener ignición es  $2 \times 10^{14}$  (partículas  $\text{cm}^{-3}$  s) y la energía media del plasma (su temperatura) debe ser 25 keV.

Si la única pérdida de energía del plasma se debe al escape de radiación de bremsstrahlung (lo que significa que nos hallamos en condiciones tales que  $\tau$  resulta infinito) entonces la temperatura de ignición decrece hasta 4.4 keV. Por consiguiente, a fin de generar energía de fusión es necesario alcanzar temperaturas de plasma muy significativas y una calidad importante del confinamiento, medida por el valor del producto  $n\tau$ . Por ejemplo, para una temperatura de 10 keV el producto  $n\tau$  debe ser mayor que  $3 \times 10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$  s.

El confinamiento magnético actúa sobre plasmas de muy baja densidad, es decir con una densidad de  $\approx 3 \times 10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$  s, la cual es cerca de  $10^{-8}$  veces la densidad normal. Por lo tanto el tiempo característico de pérdida de energía en estos sistemas debe ser algo mayor de un segundo. Este tiempo nos da una idea de la calidad del confinamiento magnético requerido. En este régimen el plasma se puede mantener en un estado de balance energético y podría

operar en forma estacionaria si las cenizas de la reacción de fusión, es decir el helio que se genera, fueran continuamente removidas - porque en caso contrario apagarían la ignición del plasma - y si el combustible de fusión fuera permanentemente renovado.

El confinamiento inercial, en cambio, opera con plasmas de altísima densidad, esto es con alrededor de  $10^{25}$  -  $10^{26}$  partículas por  $\text{cm}^3$ , es decir entre 1,000 y 10,000 veces la densidad normal. En ese estado el tiempo de confinamiento puede ser brevísimo, tan solo de unos 20 picosegundos ( $20 \times 10^{-12}$  s). La meta de la ICF es alcanzar una temperatura de 4.4 keV en el centro de un pellet de combustible de fusión fuertemente comprimido mientras queda suficiente masa cerca del centro, de modo que el tiempo de expansión y dispersión supere el tiempo mínimo de quemado, que es de unos 20, o poco más, picosegundos. Esta condición se expresa corrientemente en términos del producto de la densidad de masa,  $\rho$ , en gramos por  $\text{cm}^3$ , y el radio  $r$  del plasma comprimido. Un valor de  $n\tau$  de  $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$  corresponde aproximadamente a un valor de  $\rho r$  de 0.3 gramos por  $\text{cm}^2$ .

### Avances de la tecnología de la fusión por confinamiento magnético

En la gran mayoría de los casos las investigaciones de fusión se hacen con plasmas de deuterio. Por muchos años el tritio, que es radioactivo, no fue empleado en los proyectos de confinamiento magnético porque las exigencias de su manipulación remota complicaban los experimentos, y además dejaría en estado radioactivo la cámara de confinamiento. El primer experimento con D-T fue realizado en 1991, el proceso de fusión duró unos dos segundos y produjo una cantidad de energía significativa, cerca de 20 veces mayor que la obtenida en experimentos con D-D a igualdad de condiciones.

Un parámetro de calidad para medir la eficiencia del plasma como generador de fusión es el factor de ganancia energética  $Q$ , definido como  $Q = (\text{potencia de fusión})/(\text{potencia de calentamiento})$  empleando la potencia de fusión que se produciría si el plasma fuera constituido por D-T. Durante tres décadas de investigaciones de confinamiento magnético  $Q$  creció desde  $10^{-7}$  en 1965 hasta  $\approx 1$  en 1995. Esta condición,  $Q = 1$ , que se denomina *breakeven* pudo ser finalmente alcanzada. Los experimentos actuales logran confinar plasmas cuyos volúmenes ocupan  $100 \text{ m}^3$  a temperaturas cercanas a los 30 keV.

Hay que tomar nota, sin embargo, que el breakeven se calcula poniendo en el balance sólo la energía que se emplea en calentar el plasma, y no se cuenta toda la energía necesaria para mantener los campos magnéticos y la operación auxiliar. Además se multiplica por 100 el  $Q$  del experimento D-D para obtener el  $Q$  virtual de la mezcla D-T, con lo cual se supone una operación ideal en la que el rendimiento de la mezcla D-T es el máximo posible respecto al experimento real con D-D.

Los experimentos en los que se alcanzaron las condiciones de breakeven mencionadas tuvieron lugar en Europa, Japón y EEUU. Se trata de tres grandes equipos de la clase tokamak, el *Joint European Torus* (JET) un emprendimiento multinacional ubicado en el UK, el *JT-60* del Japan Atomic Energy Research Institute, y el *Tokamak Fusion Test Reactor* (TFTR) en el Princeton Plasma Physics Laboratory.

En 1994 el TFTR generó unos 10 megawatts de fusión a expensas de una potencia similar de inyección de energía para el calentamiento del plasma. El TFTR empleó en esa ocasión una mezcla de D-T, para poder conocer el factor de multiplicación energético efectivo

respecto de la reacción D-D. De allí en más casi todos los experimentos han operado con deuterio, o bien con hidrógeno.

La experimentación con plasmas bajo condiciones de abundante fusión es crucial para poder establecer con certeza la influencia de las partículas alfa de gran energía, producidas por las reacciones de fusión, sobre el confinamiento mismo y también su eficacia para un calentamiento adicional del plasma. Los plasmas altamente reactivos van a operar en un nuevo régimen físico, cuyas propiedades se han conjeturado solamente por vía teórica y que deben ser sometidas a validación experimental. En otras palabras, en vista de la operación de un futuro reactor de fusión podrían manifestarse otros efectos tanto positivos cuanto negativos, al presente inesperados.

Por lo tanto, el paso siguiente en el camino hacia un reactor de fusión es la construcción de una facilidad experimental para estudiar el plasma bajo condiciones de ignición, o sea con un factor  $Q$  infinito, si esto fuera posible de alcanzar. Ya se dijo que la presencia de las partículas alfa en el plasma reactivo constituye al momento actual una de las mayores incógnitas de la física del futuro reactor. Por otra parte, a medida que fue progresando la comprensión de la física del plasma y fue mejorando el factor  $Q$  de los experimentos, también se fueron poniendo cada vez más en evidencia los formidables desafíos tecnológicos que debería superar el futuro reactor de fusión para ser práctica y económicamente factible. La solución de los problemas de ingeniería, de materiales resistentes a altos flujos de bombardeo por neutrones, de mantenimiento y manipulación remota de estructuras en estado radioactivo, aparece hoy como sumamente difícil.

#### **4. Prospectiva de la fusión para las próximas décadas**

##### El problema de la factibilidad de un reactor

A partir de la década de 1980, debido a investigaciones y estudios de diseño de ingenieros y físicos, tanto de algunos ligados con los grandes proyectos nacionales en países avanzados, como aquellos de instituciones universitarias o académicas independientes, comenzó a difundirse la noción de que la realización práctica de un reactor de fusión tipo tokamak era una quimera, por lo menos al estado de la tecnología de nuestro tiempo.

Entre las principales figuras en esta búsqueda de transparencia en el análisis de proyectos de fusión nuclear, se deben destacar al Ing. Carruthers del UK, al Ing. Schmitter de Alemania, y también al más joven Ing. Heindler, prematuramente desaparecido el año pasado debido a enfermedad incurable. Los dos primeros nombrados fueron fuertemente resistidos por el *establishment* de fusión en sus respectivos países por sus conclusiones pesimistas, y finalmente presionados a solicitar una jubilación temprana.

Básicamente el problema se puede resumir así. El proyecto de reactor necesita superar tres pruebas: la factibilidad científica, la factibilidad tecnológica o de ingeniería, y la factibilidad económica. La primera es muy difícil de probar y aunque ha habido grandes y significativos avances como hemos dicho, su resultado es aún incierto. Hay muchos científicos que abrigan grandes esperanzas, y también hay un buen número de escépticos.

Suponiendo lograda la demostración de factibilidad científica, las enormes exigencias a las que es sometida la primera pared del reactor, la recuperación del tritio, la activación de toda

la estructura, y los formidables problemas de mantenimiento, permiten afirmar que hoy tanto cómo en 1980 la factibilidad de la ingeniería física del reactor no está probada. Finalmente el enorme costo, no sólo financiero sino energético de la construcción del reactor, con un retorno energético estimado en unos treinta años, permiten concluir que en el presente estado de las economías mundiales y salvo *breakthroughs* tecnológicos futuros, hoy desconocidos, la factibilidad económica actual es negativa.

Por ese motivo muchos científicos que no estaban fuertemente comprometidos con la física del tokamak se alejaron de esa línea de investigación. Algunos para seguir explorando otros conceptos alternativos de fusión, muchos para dedicarse a los plasmas de la astrofísica o los plasmas del espacio interplanetario, y otros más a una variedad de líneas de investigación tecnológica con interesantes aplicaciones de los plasmas, pero sin el objetivo fusión.

### El próximo futuro en confinamiento inercial

Por otro lado las investigaciones en fusión por confinamiento inercial también han avanzado mucho. Con el método de la implosión por láser se han obtenido densidades comprendidas entre 100 y 200 veces la densidad del deuterio-tritio al estado líquido. En el Lawrence Livermore National Laboratory de California, el producto  $\rho\tau$  (densidad por tiempo de confinamiento energético) alcanzó el valor de  $5 \times 10^{14}$  segundos por  $\text{cm}^3$  empleando el equipo laser más grande y más poderoso del mundo, el sistema *Nova* laser. El *Nova* es un láser de vidrio-neodimio de diez haces que opera a un nivel de 40 kjoules durante un pulso de un nanosegundo. Pero si bien este valor de  $\rho\tau$  es comparable al que representa *breakeven* para la fusión magnética, la fusión por láser necesita alcanzar un valor mayor a fin de compensar la baja eficiencia de los láser actuales.

Como consecuencia de estos progresos está en construcción en los EEUU, la *National Ignition Facility*, un complejo y avanzado experimento de fusión por láser, que debería alcanzar la ignición en 2010. Sin embargo hay que tener presente que esta facilidad experimental que se emplaza en el Lawrence Livermore National Laboratory está financiada y dedicada principalmente para la investigación de armamento nuclear, no para la producción de energía. De modo que gran parte de esa actividad se realiza bajo secreto militar.

Por otro lado, los experimentos mediante haces de iones livianos a alta energía también han hecho progresos. Los investigadores del *Particle Beam Fusion Accelerator* (PBFA) en los Sandia National Laboratories, New Mexico, EEUU, han demostrado la factibilidad de enfocar 72 haces sobre un diámetro de  $\approx 6$  mm. El objetivo es alcanzar una intensidad de 10 terawatts por  $\text{cm}^3$ , aunque se necesitarían por lo menos 100 terawatts por  $\text{cm}^3$  para realizar un reactor de fusión para la producción de energía.

### El proyecto ITER (Internacional Thermonuclear Experiment Reactor)

Después de más de quince años de postergaciones, dudas, y desinteligencias, en parte por el escepticismo de EEUU, en parte otros factores, el Experimento de Reactor Termonuclear Internacional (ITER) se puso en marcha. Se llega al acuerdo del Consorcio de los Seis, UE, Japón, EEUU, Rusia, Corea del Sur y China, el 28 de junio de 2005 en Moscú. Luego de una larga y ardua puja entre Francia y Japón finalmente se construye en el célebre Centro Nuclear de Cadarache, en Provenza. Más que un proyecto de física es un emprendimiento de ingeniería especializada, *engineering physics*, aunque subsistan incertidumbres en áreas

científicas. Se invertirán 10 000 millones de Euros en 30 años. La UE contribuye con 40 %, Francia y Japón 10% cada uno, y el restante 40% va repartido entre los otros socios. Los contratos serán repartidos en función, principalmente de los aportes financieros y de *know-how*. Contribuciones menores de otros países interesados podrán ser consideradas por el Consorcio. Por ejemplo, en 2006 autoridades científicas brasileñas comenzaron a negociar una participación en los estudios de ITER a cambio de la provisión de Niobio, un metal raro empleado en aleaciones para campos magnéticos producido por superconductores.

Notemos dos cosas: a) que el proyecto se sigue llamando “*experimento*” de reactor, y no “*prototipo*” de reactor, porque no hay seguridad de que logre demostrar la factibilidad de reactor en los distintos aspectos; b) la producción de energía - sea cual sea el resultado, demostración de ignición en el mejor de los casos, o más modestamente superación de *breakeven* con un factor de calidad mayor que el ya alcanzado - en cualquier caso está prevista para 2050.

Para ese momento todos los principales actores y responsables, junto a un gran número de ingenieros y científicos, ya se habrán jubilado, tal vez unos cuantos ya habrán llegado a la casa del Padre Celestial. Por otro lado, ITER producirá una considerable activación económica en ciertos sectores de alta tecnología, y en la industria de la construcción. También cabe esperar de ITER importantes *spin-offs*, o resultados co-laterales, en desarrollos científicos y tecnología de punta. El proyecto genera unos 3500 puestos de trabajo y por supuesto ingenieros, físicos y técnicos, están de parabienes.

A pesar de estas opiniones personales escépticas, creo sin embargo que no es bueno estar ausente en estos emprendimientos internacionales de gran envergadura. Estoy convencido de que habría que hacer el esfuerzo de negociar aunque sea una modestísima participación como asociado observador, a cambio de una cuota que el país pueda afrontar. Es decir, constituir un pequeño grupo de especialistas que siga la evolución del proyecto *in situ*, para estudiar y mantener informada la CNEA. *To keep in touch* es un sabio consejo en estos casos, y posibles oportunidades o aperturas para la tecnología argentina no se van a dar nunca si no se mantienen las conexiones.

#### Spin offs - o ventajas co-laterales asociadas a las investigaciones en fusión nuclear

Las ventajas colaterales de las investigaciones resultan en primer lugar la adquisición de “*know-how*” en “*energy storage, compression and switching*”, o sea cómo se logra en la práctica eficiencia en acumulación, compresión y liberación impulsiva de la energía. Se trata de desarrollos de ingeniería de altísimas potencias para el desencadenamiento ultrarrápido de energía.

La generación de grandes campos magnéticos mediante experimentos de compresión con explosivos químicos, realizados en centros de ensayos de explosivos, con los cuales se han logrado alcanzar hasta decenas de Megagauss (1000 Teslas) por brevísimos instantes. Sirven para el estudio de materiales en altísimos campos magnéticos, y sus propiedades de radiación y transporte. Este tema es afín al siguiente, las micro-implosiones mediante compresión electromagnética, o mediante haces de iones o laser, a escala de laboratorio de píldoras, o *pellets*, de fusión e híbridos. Se trata de la experimentación controlada en laboratorio de configuraciones en miniatura, de las que se pueden extraer información de interés para el diseño de armamentos.

Veamos un ejemplo. Una explosión nuclear desata energía en una variedad de formas, la onda expansiva, el calor, la radiación, o sea, rayos X, rayos gamma, y neutrones. Variando el diseño, ciertos efectos se pueden acentuar para propósitos militares particulares. En el arma con incremento de radiación, vulgarmente conocida como bomba de neutrones, el objetivo es minimizar el efecto mecánico de la onda de expansión, y aumentar en cambio fuertemente la radiación de neutrones. Un arma de este tipo es mortal para el avance de tropas enemigas en territorio amigo, mientras que se reduce – se espera – el efecto sobre la ciudad propia y su entorno campestre. Según se dice, el arma es pequeña, produce cerca de un kilotón de energía, y utiliza un combustible D-T en dos etapas, en lugar de litio deuterado, a fin de maximizar la producción de neutrones rápidos. Los EEUU desarrollaron esta arma como cabeza de un misil antibalístico en la década de 1970. Luego se la adaptó para ser usada con el Lance, un misil balístico de corto alcance, y para la artillería convencional con proyectiles de 8 pulgadas.

La lista de investigación especializada relacionada con fusión continúa. Tenemos los láseres de alta potencia. Los haces de electrones y haces de iones de alta potencia. La aceleración de partículas de polvo electrificado, “dusty plasmas”. Los “*macrons*” o sea macropartículas de alta energía cinética, también denominados “fast dust”, aunque son muy difíciles de producir. El ensayo de haces de potencia para el propósito de ataque a satélites, o equipos ubicados, en el espacio exterior, es decir sistemas ASAT. Finalmente, “*last but not least*”: la simulación de todos estos procesos por supercomputadoras.

La política de investigación y desarrollo en estos sectores de EEUU, Rusia, Japón, UK, Francia, China, India y otros países de la UE, les abre el camino hacia importantes nuevas tecnologías. Permite un proceso, en gran parte cubierto por secreto, de renovación tecnológica e invención de nuevos aparatos e instrumental para sistemas defensivos – ofensivos, y su miniaturización.

Muy importante, yo diría decisiva, es la ventaja que las grandes potencias adquieren con la formación, preservación, y renovación de equipos de especialistas, científicos y técnicos, en estas áreas. Sin hablar de la adquisición de datos y parámetros físicos de importancia crítica. Entre los institutos especiales de investigación y desarrollo que cuentan los países líderes, descuellan en importancia los que se ocupan del avance de muy sofisticados códigos de simulación numérica, para el estudio de procesos físicos de interés en estas áreas, y de su validación, incluyendo los desarrollos de aplicación militar clasificados como secretos.

## **5. 2006-2007: Las Sacudidas del Ordenamiento Internacional** <sup>[7]</sup>

Visto a vuelo de pájaro el panorama de las investigaciones físicas de importancia estratégica relacionadas con la fusión nuclear, abiertas o secretas, paso ahora en revista algunos eventos ocurridos desde las reuniones del Comité en 2006. El informe del Lic. Jinchuk sobre la situación nuclear en Medio Oriente, y el valioso conocimiento que aporta el Embajador Oscar Fernández sobre la situación nuclear en Asia, con su participación en reuniones internacionales especializadas, me eximen de un repaso de antecedentes. Lo que sigue es un complemento a los informes de esos autores. Comento algunos hechos críticos en asuntos nucleares, junto con otros vinculados a seguridad y defensa, ocurridos desde julio de 2006 hasta mayo de 2007.

Dos eventos muy destacados de ese período, me refiero al ensayo nuclear de Corea del Norte en octubre 2006, y un paso significativo en el proceso de acercamiento, o “*partnership*”, India – EEUU en diciembre 2006 fueron objeto de debate en dos reuniones de este Comité. Una a fines de 2006 para comentar la situación creada por Corea de Norte, y la otra hace muy poco en abril de 2007 con la presencia del Sr Embajador de la India. Por esa razón, mencionaré sucintamente esas dos cuestiones, aunque reaparecerán en los comentarios finales.

Julio de 2006. Un año antes, el 4 de julio de 2005, fiesta patria de los EEUU, la NASA había probado un dispositivo para un futuro sistema de defensa contra asteroides peligrosos. Eyectado por la sonda *Deep Impact* un proyectil hizo blanco en el cometa Tempel 1 a 133 millones de km de la Tierra. El proyectil llevaba una esfera de cobre macizo en la punta, y moviéndose por inercia impactó con una energía equivalente a una explosión de 5 kilotonos<sup>[8]</sup>. Lo destaco porque, más allá de la habilidad técnica de la misión, es un ejemplo de empleo de un *driver* como los que se ha especulado con utilizar en fusión inercial. Mientras que los “*macrons*” o macro-objetos de altísima energía cinética son muy difíciles de acelerar y producir en laboratorio, son en cambio factibles en el espacio exterior seleccionando oportunamente la órbita. Es evidente la relación con los sistemas de defensa – ofensa en el sector militar espacial.

Un año después, en 2006, durante el mismo 4 de julio NorCorea lanza siete misiles de variado alcance por sobre el Mar del Japón, lo que es considerado por Japón como una provocación y una amenaza directa, aumentando la presión sobre los planes de rearme de ese país. Cabe anotar también que el misil balístico intercontinental NorCoreano Taepodong-2 falla y precipita luego de cuarenta segundos de vuelo.

Septiembre de 2006. La tormenta se acumula sobre Irán. El 6 de septiembre el Presidente Bush define el Presidente de Irán como un tirano, y compara la amenaza de su régimen con la de Al Qaeda. Ahmadinejad replica que Bush no es nada frente a la voluntad de Allah, y que quienes lo desobedecen terminan mal. El 10 de septiembre el ministro de Relaciones Exteriores de la UE, Javier Solanas, lanza un “*last call*” a Teheran, para que evite las sanciones. Rusia respalda parcialmente, y solicita a Irán que abandone sus planes de enriquecimiento. China más tibiamente invita Teheran a tomar en cuenta las preocupaciones internacionales. En una entrevista, Daniel Pipes, fundador del *Middle East Institute* y asesor, tanto del gobierno cuanto del congreso de EEUU, expresa su escepticismo y considera estériles las negociaciones de la UE. Expresa que el diálogo sólo será posible si Irán recibe una lección. No sugiere una guerra sino el bloqueo económico, y de no surtir efecto, un empleo de la fuerza limitado a la destrucción de las plantas de enriquecimiento. De hecho, en los meses que siguen se incrementa significativamente la concentración naval de EEUU en el Golfo Pérsico.

Octubre de 2006. Kim Jong Il ordena realizar el primer test de un arma nuclear. Los datos sísmicos confirman la explosión. Por un tiempo flota la duda, ¿nuclear subterránea o treta mediante explosión convencional gigante? Estados Unidos ha anunciado que considera un ataque atómico a Corea del Sur o a Japón como un ataque a su propio territorio y que responderá en consecuencia. Pero si la inseguridad que genera el régimen tiránico de Kim Jong Il aumenta, Japón y Sur Corea podrían verse obligados a producir armamento nuclear también. Japón, un gigante de la industria nuclear, podría convertirse en un país con armas nucleares en un santiamén. Aunque SurCorea está siguiendo una política de cautela y

conciliación con el Norte, si Tokio el rival histórico de Seul se torna nuclear, SurCorea podría tomar el mismo camino, no sólo por razones de seguridad sino también de orgullo nacional.

Noviembre de 2006. Espías y veneno nuclear: el caso Litvinenko. En mi opinión este asunto es un síntoma grave de cómo van las cosas en Rusia. El 1 de noviembre después de una serie de encuentros en los alrededores de Piccadilly Circus en Londres, Alexander Litvinenko, un ex espía ruso y refugiado político, se siente mal y es internado en el University Hospital. Los médicos no aciertan con el diagnóstico, hasta que con el pasar de los días se manifiesta un envenenamiento por radiaciones, y Litvinenko fallece el 23 de noviembre. Se detecta el envenenamiento con Polonio 210 ( ${}_{84}\text{Po}^{210}$ ) que tiene un decaimiento radiactivo con vida media de 138 días, en el cual se emite una partícula  $\alpha$  de 2.67 Mev. A parte el muy alto costo, ese material no está al alcance de cualquiera. Doce lugares de Londres con trazas de Po 210, miles de personas que se hacen controlar por posible contaminación.

Estalla un escándalo internacional. Las sospechas recaen sobre los servicios secretos rusos y la valija diplomática de Rusia a Londres. En septiembre el distinguido historiador ruso Vladimir Bukovskij, disidente que reside en Cambridge, UK, había alertado, en un ensayo titulado "Rusia y Europa después de la Caída del Muro", que Rusia es un país que todavía está muy lejos de la democracia y en el cual ha prevalecido la gente del ex KGB. El repudiable asesinato de la periodista opositora Politovskaya se inscribe en este cuadro de involución de las libertades básicas.

La interpretación del asesinato de Litvinenko es compleja y no voy a entrar en ese análisis. Pero deseo anotar dos cosas, a) el episodio confirma la creciente preocupación mundial acerca de la posibilidad de terrorismo nuclear, en particular por la situación de control precario de los repositorios de HEU en Rusia; b) es un signo desalentador del deterioro del respeto y cautela mutua que solían guardar las grandes potencias en las operaciones de inteligencia que realizan en los respectivos países.

Diciembre de 2006. El entendimiento nuclear EEUU-India que se venía negociando desde algún tiempo atrás recibe un espaldarazo importante, aunque falta dar algunos pasos más para materializar este tratado El 9 de diciembre de 2006 el Congreso de los EEUU vota a favor del tratado con 330 votos a favor y 59 en contra, con una mayoría *bi-partisan*. Hemos escuchado la disertación del Sr. Embajador de la India sobre este discutido acuerdo hace pocas semanas lo que me exime de dar más detalles. La objeción principal formulada es que de hecho establece un doble-standard, con discriminación entre países amigos y enemigos de EEUU, lo cual afecta el TNP (Tratado de No Proliferación).

El acuerdo de asociación especial EEUU-India pone indudablemente nuevos problemas para los países que desean sostener la vigencia del TNP. Dificultades que deberán ser sorteadas con ecuanimidad, por los responsables de revisar el tratado sin introducir distinciones especiales "*ad hoc*". Un eventual derrumbe del TNP, con todas las importantes iniciativas asociadas que forman el contexto internacional que se ha esforzadamente construido alrededor del TNP durante décadas, sería un retroceso muy grave que hay que tratar de evitar.

A mi juicio, y por analogía con el caso de la convivencia civilizada dentro de un Estado, repudiar el tratado sería equivalente a renunciar al derecho y al sistema de justicia porque se han encontrado jueces corruptos, o abusos y fallas del sistema. Sería un salto hacia la barbarie. Sin contar que una carrera hacia la nuclearización general impondría una carga

económica indeseable e insoportable sobre las poblaciones con problemas de subsistencia en muchos países.

El 11 y 12 de diciembre de 2006 se realiza una pseudo-conferencia sobre el Holocausto, organizada por Teheran, con negacionistas de todo el mundo invitados por el Presidente Ahmadinejad. Al cierre, declaraciones del presidente de Irán: Israel pronto será borrado del mapa. Condenas de las principales naciones europeas, declaraciones de los primeros ministros Blair y Merkel, y el ministro de relaciones exteriores D'Alema, y diplomáticos de EEUU. También la Santa Sede expresa su preocupación. Célebres abogados de EEUU solicitan la incriminación de Ahmadinejad ante la Corte de la ONU. Las frases inaceptables deterioran el nivel del lenguaje de las relaciones internacionales y generan inestabilidad en un ámbito tan delicado como el ordenamiento nuclear.

Descontada la competencia demagógica con Al Qaeda para conquistar la simpatía de las masas árabes, la preocupación por las elecciones inminentes en Irán (en las que no le fue muy bien aunque las ganó) y por remontar la oposición de las clases medias y de los sectores intelectuales de su país. ¿Cuál es el propósito de Ahmadinejad con respecto a Occidente, visto que con su actitud pone en dificultades incluso a los simpatizantes con que cuenta entre las izquierdas europeas?

Algunos observadores estiman que pesa mucho la crisis interna, las dificultades en la economía y la escasez de recursos. En suma, que el régimen de Ahmadinejad trastabilla y que emplea esas declaraciones pirotécnicas para disimular su debilidad. Debe hacer frente al sector más cultivado de la sociedad, refinado en algunos aspectos, que está descontento. Que por iguales motivos y para sobrevivir, Ahmadinejad apretará el acelerador de la cuestión nuclear intentando una fuga hacia delante. Lo transmito como lo he leído, *relata refero*.

El 13 de diciembre de 2006 ¿Gaffe nuclear o advertencia de Israel? Ehud Olmert, el primer ministro de Israel, de visita en Berlín accede a la entrevista de una TV alemana, el canal 24, y expresa "Teheran abiertamente, explícitamente y públicamente amenaza con borrar Israel del mapa. Pregunto, mientras ellos aspiran a conseguir armas nucleares ¿Se puede afirmar que este es el mismo nivel de discurso de los EEUU, Francia, Israel o Rusia?"

La frase es inmediatamente interpretada como una admisión indirecta de que Israel posee armas nucleares. Y que por lo tanto Olmert abandona la tradicional ambigüedad del Estado de Israel acerca de su poderío nuclear, política denominada vulgarmente como "*la bomba en el sótano*". Olmert luego aclara reiteradamente, "Nosotros no vamos a ser los primeros a introducir armas atómicas en Medio Oriente", la tradicional fórmula de la diplomacia israelí, mientras que sus portavoces desmienten la interpretación afirmando que el Premier solamente hacía una lista de naciones con comportamientos responsables, y no de aquellas que poseen arsenal nuclear. Pero el gato ya estaba fuera de la bolsa y la declaración de Olmert genera considerable ruido.

Enero de 2007. Otro episodio del deterioro del lenguaje de las relaciones internacionales entre los estados. En el Día de la Conmemoración del Holocausto, la Shoah el día de la memoria, Mahmoud Ahmadinejad proclama otra vez la próxima desaparición del Estado de Israel. Dados los planes nucleares iraníes, este ataque más que una provocación inaceptable es visto en las principales cancillerías occidentales como un "*peligro para el mundo entero*". El rey Abdullah de Arabia Saudita hace declaraciones a la prensa en el

sentido de que la política de confrontaciones continuadas del gobierno de Irán sobre el tema nuclear, y la cuestión de Irak, constituyen un peligro para toda la región.

Con asistencia rusa, china y norcoreana, los Ayatollah anuncian que ya tienen misiles capaces de alcanzar objetivos en la región. En 2005 los rusos habían ayudado a los iraníes a poner en órbita Sinah 1, para uso comercial según la versión oficial. Pero el propósito principal es el de tener un ojo de observación en el espacio. A fin de enero de 2007, con la colaboración de técnicos norcoreanos los iraníes ponen a punto una versión especial de Shahab 3, variante local de un misil tierra – tierra de largo alcance de Corea del Norte. En abril de 2006 Jerusalén había puesto en órbita, también desde una base de lanzamiento rusa, un satélite espía que cubre objetivos en Irán. El Eros B desde una altura de 600 km distingue hombres y vehículos. Vigila los laboratorios y las entradas de los túneles en los cuales Irán desarrolla su plan nuclear.

El 9 de enero hay un bloqueo del petróleo ruso hacia la UE por la crisis con Bielorrusia, en pleno invierno del hemisferio norte. La primer ministro de Alemania, Merkel ataca al presidente Putin. Queda en evidencia la debilidad de la UE ante un posible chantaje de Rusia. Merkel propone revisar la política sobre la energía nuclear, pero la izquierda de Alemania es reacia a cambiar el rumbo fijado por la agenda de los ecologistas por el temor a perder votos.

El 11 de Enero de 2007, sin previo aviso, China prueba con éxito un sistema ASAT, lanza un misil que destruye un viejo satélite meteorológico en desuso. El evento ocurrió a 865 km de altura, en órbita próxima a la de los satélites espías de EEUU. El lanzamiento interrumpe una moratoria que duraba desde 1985. EEUU pide explicaciones, y Japón se queja de la falta de transparencia de la política militar China.

Como reacción a las ambiciones de los Ayatollah, los seis países del Golfo comienzan conversaciones sobre la energía nuclear proponiendo un programa atómico común.

A fines de enero, se acentúa la crisis entre EEUU y Rusia, con protestas mutuas acerca del sistema de protección antimisiles que EEUU va a instalar en la república Checa y en Polonia. El sistema está diseñado para constituir un escudo a los países de Europa de posibles ataques de misiles de NorCorea e Irán. La cuestión se convertirá en un contencioso cada vez más inflamado durante los meses siguientes.

Febrero de 2007. Irán anuncia que las centrífugas de Natanz serán 3000 operando en cascada. El 2 de febrero, el Presidente de Francia Jaques Chirac pronuncia frases que levantan una polvareda. En una entrevista a New York Time, Herald Tribune, and Nouvel Oservateur se deja escapar el siguiente comentario “El peligro no es la bomba que aspira Irán. ¿Adonde la va a lanzar? ¿Sobre Israel? No haría ni 200 metros en la atmósfera que ya Teherán estaría destruida. El peligro está en que otros países de la región se preparen para el nuclear militar”. Más tarde rectifica, “fueron palabras apresuradas, *off the record*”. Declara luego: “Irán no debe dotarse de armas nucleares”. Los comentarios sobran.

A mediados de febrero 2007 se intensifican las tensiones entre EEUU y Rusia con reproches mutuos. Para los observadores el nudo de la cuestión es Teheran. Para los EEUU Teheran interviene en Iraq y corre hacia el armamento nuclear. Los Rusos no quieren perder sus negocios de industria nuclear en Irán por un eventual ataque limitado a las plantas nucleares, aunque tampoco ven con favor una bomba en manos de los Ayatollahs.

El 13 de Febrero la UE aprueba las sanciones ONU contra el programa nuclear de Teheran, pero deja abierta una puerta para tratar. Al día siguiente, de la oficina de Javier Solanas se filtra un informe interno de tres páginas que aparece luego en la primera página del *Financial Times*. El carozo del informe es que ya es demasiado tarde para frenar la bomba nuclear de Irán. Solanas reacciona diciendo que es una manipulación del *Financial Time*, pero el daño ya está hecho <sup>[9]</sup>.

Marzo de 2007. El presupuesto militar de China aumenta en un 20 %. La NASA da explicaciones acerca de su proyecto con bombas nucleares para destruir asteroides peligrosos. Hacia fin de marzo se aprueba la resolución 1747 de la ONU, sanciones si Irán no abandona el proyecto de enriquecimiento.

Abril de 2007. A principios del mes, nuevo informe ONU sobre la emergencia climática, también firman EEUU y China. Ahmadinejhd desafía “nadie puede detenernos”, las tres mil centrífugas de Natanz han sido activadas. Nuevo choque de Rusia con EEUU, a fin de abril Putin suspende el tratado para la reducción de armamentos en Europa.

Mayo de 2007. El problema nuclear se complica en estos mismos días, porque ante la evidente reluctancia, o incapacidad de la UE, para proceder decididamente en el caso Iran, y las limitaciones de EEUU para actuar en las etapas finales del gobierno Bush, ocurre que los países Árabes, desde los Emiratos del Golfo hasta Arabia Saudita, todos quieren ser nucleares. Es decir, todos le han comunicado a Mohammed El Baradei, Director del OIEA, que necesitan urgentemente la energía nuclear, cómo si tuvieran escasez de combustible.

A nadie se le puede escapar que desean los reactores nucleares principalmente por lo que viene detrás. Porque estiman que Irán se saldrá con la suya, que la resolución 1747 del Consejo de Seguridad de la ONU de marzo 24 de 2007 que prevé sanciones contra Teheran si en dos meses no renuncia al plan de producción de uranio enriquecido “*dual use*”, no surtirá efecto. En suma que la comunidad internacional no lo va a detener.

En abril de 2006 el Presidente de Egipto, Hosni Mubarak había declarado “*Irán tiene una evidente influencia sobre los sciitas. Y los sciitas son en su mayoría fieles a Irán, no a los estados en los cuales viven.*” En enero de 2007 Abdullah, el rey de Arabia Saudita, recalcó “*Hay un país que está intentando convertir los árabes sunitas al sciismo. Pero la mayoría de los sunitas jamás abandonará su fé.*” El temor de los países del área es que Irán termine por convertirse en el mandamás de toda la región esgrimiendo el báculo del arma nuclear, como señalan los informes del *Gulf Research Center* que opera en Dubai.

Alberto Ronchey, un reputado analista de política internacional, definió hace pocos días la situación como “*contagio nuclear*”: en su opinión los Estados del Golfo quieren la atómica. Ahora también desean reactores nucleares Arabia Saudita, Kuwait, Bahrein, y los Emiratos, Oman y Yemen. Con la información del Lic. Jinchuck de agosto de 2006 y las sucesivas provocaciones de Ahmadinejhd esto se podía prever y ahora efectivamente está sucediendo. El escenario futuro en esa región es de pesadilla.

## 6. Algunas reflexiones históricas

### La historia reciente

El Embajador Oscar Fernández me pidió alguna reflexión histórica. He pensado recordar la cuestión de los dos Kahn, la homonimia que se ha venido señalando en varios ensayos sobre temas nucleares, desde 2004 hasta el presente. Ello me da pié para comentarios adicionales sobre proliferación y las cuestiones candentes, que aparecen relacionadas entre sí por un hilo común.

Herman Kahn, como se recordará, es evocado en una película de Kubrick, "*Dr Strangelove or How I came to love the Bomb*", impersonado por Peter Sellers en una genial caricatura. Por aplicación de la teoría de juegos a la guerra nuclear, la célebre doctrina de H. Kahn fue, dicho en dos palabras, que si no logramos maximizar nuestras ganancias mediante el desarme tal vez podamos minimizar nuestras pérdidas con un agresivo incremento de armamentos nucleares. H. Kahn, como se sabe, defendió la doctrina de la destrucción mutua asegurada, *MAD* "*mutual assured destruction*", como una vía para mantener la paz.

Pero la historia del arma atómica registra otro Kahn, que tal vez ya tenga reservada en los anales una posición de igual relevancia. Se trata del Dr A. Q. Kahn, Paquistaní casi desconocido salvo en círculos especializados hasta hace pocos años. Su actividad quedó expuesta en 2004 y más recientemente en 2006 alcanzó gran notoriedad por la difusión de su caso en los *mass media*, incluyendo un video-documental sobre sus andanzas. A. Q. Kahn tuvo un papel crucial en el desarrollo del arma nuclear de Pakistán, que muchos comentaristas ya califican como la "*Bomba Islámica*", por hechos que A. Q. Kahn lideró después y por sus abiertas simpatías con actores del terrorismo de raigambre musulmana. Terrorismo que se auto-titula islámico, como se ha dicho, puesto que pretende usurpar para sus fines la religión del Islam.

A. Q. Kahn vendió tecnología nuclear, básicamente tecnología de enriquecimiento de uranio, a Irán, Libia, y Corea del Norte. El año pasado escuchamos en este comité la interesante exposición del Sr Embajador de Pakistán, pronunciada con gran solvencia profesional. Hizo también una aclaración, que Pakistán no había fabricado la bomba para terceros sino sólo para su defensa, y menos para venderla a otros países musulmanes. En vista de lo que se sabía sobre la actuación de A. Q. Kahn muchos de los presentes quedaron perplejos.

El problema es que A. Q. Kahn no se comidió en transferir tecnología a los estados pro-terrorismo que se mencionaron, solamente porque pensara que con un poco de *MAD*, estilo tercermundista, se favorecería la paz en virtud de la probada doctrina de su homónimo Kahn. Lo hizo por plata, por mucha plata como fue puesto en evidencia luego que Libia desistió de su proyecto de arma nuclear y proveyó información acerca de la extensión del mercado nuclear clandestino establecido por A. Q. Kahn. ¿A. Q. Kahn hizo todo sólo y por su cuenta? ¿Un exitoso *self-made man* del mundo musulmán? ¿Por qué los servicios de inteligencia de las grandes potencias y la red de información del OIEA tardaron tanto en darse cuenta?

La idea del "*nuclear deterrent*", la disuasión nuclear, como dijimos, se basaba en la hipótesis de que la penalidad que se pagaría por desafiarla era demasiado terrible. Analistas competentes de política internacional han sostenido con abundancia de argumentos que el largo período de equilibrio del terror, más de sesenta años de paz que las naciones más avanzadas han disfrutado, ha sido posible precisamente gracias a la existencia de esas

armas de destrucción. Se afirma que sin lugar a dudas la URSS y la NATO se hubieran enfrentado en otra guerra mundial si los dirigentes no hubieran temido las consecuencias del arma nuclear.

Las bases de ese orden mundial se sacuden ahora con la llegada del otro Dr. Kahn. Aquel que, valga la metáfora, ha vendido el secreto de esa configuración meta-estable del mundo por treinta monedas de plata. La teoría de juegos de Hermann Kanh no funciona más. Se ha echado a perder, porque los terroristas y los *estados canallas* que los sostienen y financian son gobernados por otra física que no está a mi alcance, una mecánica que rige en la dimensión psicótica.

Según parece la humanidad no está todavía en condiciones de eliminar las guerras. En efecto, la agresividad primordial - el cristiano diría el pecado original - ha encontrado un sustituto a la guerra en el terrorismo. Ese sustituto, el terrorismo, busca activamente un arma nuclear y A.Q. Kahn le ha dado un buen empujón para ponerlo en camino.

Bajo la presión de EEUU, Pakistán obtuvo su confesión en 2004. Pero el presidente de Paquistán, General Pervez Musharraf aceptó su arrepentimiento, y visto su prestigio popular como héroe nacional lo perdonó, poniéndolo bajo cómodo arresto domiciliario. EEUU ha tenido que soportar esa farsa porque le hace falta, en Afganistan y en la lucha contra Al Qaeda, el apoyo que le brinda Musharraf por limitado o incierto que sea. Por otra parte, el Presidente Musharraf hace lo que puede ante una difícil situación interna. Como se sabe ha sobrevivido a varios atentados y el sábado pasado (12 de mayo 2007) el país sufrió un choque de grupos antagónicos con 30 muertos y un centenar de heridos. Anteayer, 24 muertos, decenas de heridos, en el atentado suicida al hotel Marhaba, centro de Peshawar, Pakistan sur occidental, junto al confín con Afghanistan.

La caída de la URSS, el desorden consecutivo en los países que formaban parte de esa unión en la década de 1990, así como el relajamiento de los controles sobre materiales nucleares en Rusia, sin duda han hecho lo suyo. La intensidad de las sacudidas del ordenamiento nuclear mundial se han ido incrementando y su ritmo se ha acelerado en consecuencia. Admitido esto, sigo creyendo que no se puede minimizar el efecto de la red de A Q Kahn. La traza de sus centrifugadoras aparece tanto en Corea del Norte cuanto en Irán, actualmente dos graves dolores de cabeza para la no proliferación nuclear.

Salta a la vista que el reciente acercamiento, con particulares concesiones en el área nuclear, la "*special parternship*" entre EEUU e India, se origina en buena medida en la desconfianza de EEUU hacia Pakistán como estado proliferador. Ante una pregunta específica, lo admitió el Sr. Embajador de la India en esta misma sala el mes pasado. De modo que hay un *leit-motiv* que resuena en estos episodios, desde Asia Menor hasta Extremo Oriente.

#### A modo de conclusión

Junto con la mayoría de los observadores, creo que a lo largo de la historia se destaca el predominio del principio de que la finalidad primaria del estado es la de proteger a su población. La motivación para el desarrollo de las armas nucleares durante la II guerra mundial siguió la máxima de la antigua Roma, que la seguridad de la república es la ley suprema, "*salus publica suprema lex est*". El temor que el enemigo alcance el arma antes que nosotros. Los desarrollos posteriores de las grandes potencias siguen esa ley, junto con

el bien conocido corolario, si deseas la paz prepárate para la guerra, "*si vis pacem para bellum*".

Lamentablemente, la historia no nos había preparado para la amenaza que se cierne ahora sobre todos, o sea la aparición de armas inéditas de un poder inimaginable, que hace imposible concebir una guerra de tipo tradicional entre las naciones que las poseen, pero que un error, un malentendido, o el terrorismo podría desencadenar. A continuación, el mundo se ubicó en el precario sistema del terror mutuo, el equilibrio *MAD* entre las potencias, como se ha dicho. Mientras tanto, naciones menores enfrentadas a grandes tensiones y amenazas regionales, como por ejemplo, Israel, Pakistán, India, se aferraron a la *suprema lex* y buscaron conseguir el arma atómica. Evidentemente, no confiaron en la seguridad prometida por el escudo protector de las grandes potencias y prefirieron valerse por si mismas.

Después del 11 de septiembre de 2001 los EEUU siguieron otra ley básica a la que ninguna de las grandes potencias de la historia pudo sustraerse, nadie me puede agredir impunemente, "*nemo me impune lacessit*". En el Renacimiento se encuentra formulada en *El Príncipe* a la manera de Maquiavelo, pero sigue siendo el viejo *dictum* romano, que me odien mientras me teman, "*oderint me metuant*". Sin embargo, en la conciencia de reyes o gobernantes sensatos solía regir como contrapeso el viejo proverbio italiano, "*guerra cominciata, inferno scatenato*", que no precisa traducción.

En el mundo antiguo, en la culminación de su poder los Romanos fueron "*king makers*" sin contraste. El que no obedecía era depuesto por otro rey más dócil. A menudo, sin necesidad de ejecutarla, era suficiente la amenaza latente o explícita de hacer partir las célebres legiones. Hoy el poder mundial está dividido, aunque con una significativa asimetría y está obligado a convivir a la sombra del *MAD*. No es fácil que prevalezca la voluntad del más fuerte aunque disponga de las legiones más poderosas, sobre todo cuando hay que rendir cuentas al *Senatus*, o sea en términos actuales, a un sistema democrático con instituciones republicanas.

Porque las guerras no se hacen sin dinero y ya los Romanos decían que el dinero es el nervio de las guerras, "*nervi belli pecunia*". Pero los ciudadanos de los países de Occidente se cansan de pagar cuentas, de sostener guerras, y su opinión es mudable, aunque ello afecte la seguridad, o los intereses nacionales. Finalmente, no hay secreto militar que dure bien guardado, porque como dicen los españoles "*no hay cerradura si es de oro la ganzúa*".

[10]

### Notas a pié de página

[\*] El texto es un informe para el Comité de Asuntos Nucleares. Por razones de tiempo en la reunión del 14 de mayo de 2007 algunas secciones se expusieron abreviadas.

[1] Poco tiempo después (durante el período de revisión del texto) el nuevo gobierno del UK anunció la comisión de ocho nuevas centrales electronucleares.

[2] Para  $^{235}\text{U}$  puro, la masa crítica es  $\approx 5$  kg.

[3] El Plutonio es una combinación de  $^{239}\text{Pu}$  y  $^{240}\text{Pu}$ , la masa crítica  $\approx 16$  kg.

[4] 1 barn =  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup> =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>.

[5] T, vida media 12.32 años.

[6] 1 ton = 1 tonelada de explosivo químico de alto poder, e.g., TNT; 1 Megajoule  $\approx \frac{1}{4}$  kg de TNT

[7] Las fuentes de las noticias de esta sección son principalmente los diarios *Il Corriere Della Sera* y *La Nación*.

[8] Moviéndose a la velocidad de 10.3 km/s el proyectil tenía una energía cinética de 19 Gigajoules.

[9] Vale la pena notar que un año antes, en una entrevista del *Corriere della Sera* del 3 de febrero de 2006, el Gral. (R) Carlo Jean también había sostenido que era demasiado tarde para detener la bomba de Irán, invocando razones militares, básicamente la necesidad de emplear armamento nuclear avanzado para destruir las instalaciones subterráneas que los EEUU (a su juicio) no iban a emplear para no quebrar “el tabú nuclear”. Sus conclusiones se resumían, a modo de paradoja, que si Teheran lograba la bomba los EEUU se quedarían en el Golfo por cien años más: “...simplemente la atómica persa los legitima ante los ojos de los Países Árabes y de Turquía...”.