La física atómica en el desarrollo de la fusion

La próxima etapa en el desarrollo de la fusión plantea nuevas exigencias para las investigaciones en materia de física atómica

por R.K. Janev

Diversas disciplinas científicas generales participan en la creación de la base científica y tecnológica de los reactores de fusión.

La física del plasma y las tecnologías asociadas con este estado de la materia (incluidos los grandes imanes superconductores) tratan los problemas de la creación y el confinamiento del plasma de alta temperatura, su estabilidad, el calentamiento hasta alcanzar las temperaturas termonucleares requeridas y su duración prolongada. Entre los principales problemas pendientes en la actualidad en la física y la tecnología del plasma de fusión figuran los relativos a lograr el funcionamiento casi continuo de las máquinas tokamak mediante la producción de corriente no inducida, los altos niveles de aislamiento térmico en condiciones de gran calentamiento externo del plasma y los altos valores en la relación entre la presión cinética y la magnética del plasma (denominada factor beta del plasma).

La física nuclear no sólo participa en la fusión mediante reacciones básicas generadoras de energía, sino también mediante aspectos del ciclo del combustible termonuclear (química nuclear) y de la seguridad del reactor de fusión.

La ciencia y la tecnología de los materiales tienen suma importancia para la fusión, dado que la primera pared de la cámara del reactor deberá ser capaz de resistir cargas eléctricas muy elevadas (varios MW/m^2) y tensiones térmicas derivadas del flujo de altas temperaturas, sin contaminar excesivamente el plasma con impurezas de Z alto resultantes de la interacción del plasma con la pared. Se imponen rigurosos requisitos no sólo a los materiales para la primera pared, sino también a todos los demás componentes cercanos al plasma, como los limitadores, las chapas de los blancos de los diversores magnéticos y las antenas para el calentamiento del plasma por radiofrecuencia.

La física atómica forma también parte esencial de las investigaciones en materia de fusión. Está presente en numerosas esferas importantes como la del equilibrio energético del plasma, el calentamiento, la ignición y el control del quemado, así como el diagnóstico del plasma.

Las cuatro esferas científicas y tecnológicas antes descritas no representan toda la gama y complejidad de las investigaciones en materia de fusión que se realizan actualmente, pero sí constituyen sus componentes más importantes. De igual forma, en las fases de diseño y explotación de las grandes máquinas de fusión se requiere una amplia base técnica; los experimentos con estas máquinas no pueden realizarse de forma controlada sin el auxilio de supercomputadoras.

La cifra que verdaderamente pone de manifiesto las cualidades de un reactor de fusión es la de reactividad de fusión ($n\tau_E T$). Los experimentos actuales en materia de fusión sólo pueden alcanzar aproximadamente la décima parte del valor de 3×10^{21} m^{-3} s keV requerido para un reactor. Los tokamaks de mayores dimensiones (JET, TFTR, JT-60, DIII-D), que en la actualidad sólo funcionan con hidrógeno o deuterio han alcanzado ya temperaturas de nivel de reactores ($T \sim 20$ a 30 keV), aislamiento térmico ($n\tau_E \sim 4 \times 10^{20}$ m^{-3} s) y factores beta ($\beta \simeq 6\%$), aunque en diferentes experimentos.

Las actividades en marcha para el diseño conceptual del reactor termonuclear experimental internacional (ITER), que se realizan bajo los auspicios del OIEA, se rigen por el precepto de eliminar esta diferencia y demostrar la ignición y el quemado termonuclear prolongado del plasma.*

La física atómica en las investigaciones y la tecnología de la fusión

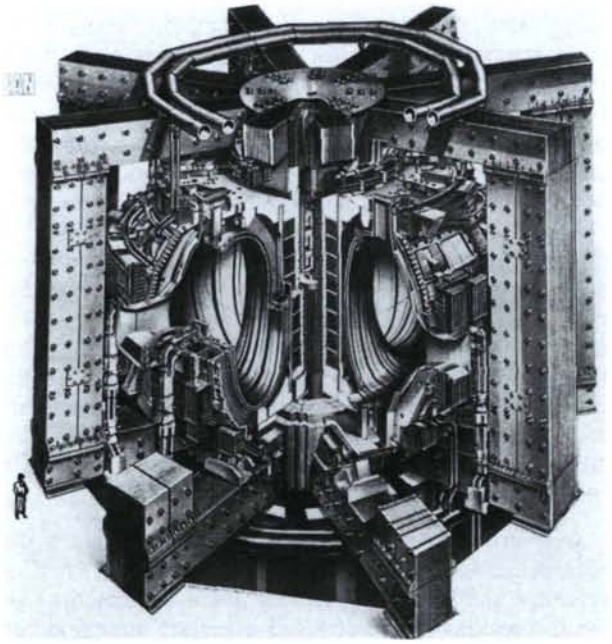
Para apreciar la importancia que ha cobrado la física atómica en la fusión, cabe señalar que a temperaturas adecuadas para el quemado termonuclear (15 a 20 keV), los procesos atómicos se desarrollan a velocidades de ocho a diez órdenes de magnitud más rápidas que la de las reacciones termonucleares de deuterio-tritio (D-T). Dado que la mayoría de los procesos atómicos son endotérmicos, consumirían la energía del plasma mucho antes de que pudiera comenzar la reacción de fusión. Incluso en un plasma de D-T puro, la radiación de frenado emitida en los choques de los electrones con los iones del plasma libera mayor cantidad de energía que la que pueden producir las reacciones de D-T, cuando las temperaturas son inferiores a ~4 keV. Este mecanismo de refrigeración de la radiación del plasma por sí solo impide la ignición

El Sr. Janev es funcionario de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

* El ITER es un proyecto de cooperación en el que participan la Comunidad Europea, el Japón, los Estados Unidos de América y la URSS.

del plasma a temperaturas inferiores a 5 keV. Las especies atómicas más pesadas, aunque sólo estén presentes en cantidadades de traza en el plasma de fusión pueden radiar enormes cantidades de energía (fundamentalmente por medio de la radiación de frenado y la radiación directa). Por eso, las concentraciones de iones de hierro por encima del 1% de la densidad del plasma impiden la ignición de un plasma de D-T a cualquier temperatura. Este valor de concentración crítica asciende sólo al 0,1% en el caso del tungsteno. Los efectos perniciosos de las especies atómicas más pesadas, que aparecen en el plasma hidrogénico como impurezas, ya se han reconocido en las primeras etapas de las investigaciones sobre fusión. Con todo, la presencia de impurezas en un plasma confinado es inevitable debido a su interacción con las paredes del recipiente contenedor. Mantener el nivel de impurezas del plasma entre límites tolerables es uno de los requisitos previos para alcanzar elevadas temperaturas del plasma y su ignición.

Para reducir al mínimo el contacto del plasma con las paredes e impedir que penetren en éste gran cantidad de impurezas de las paredes, debe colocarse un limitador material o magnético en el borde del plasma. Posteriormente, el flujo del plasma límite se dirige hacia regiones localizadas, que en el caso de los limitadores (diversores) magnéticos pueden estar situadas incluso fuera de la cámara principal del plasma. Este flujo dirigido del plasma límite arrastra las impurezas liberadas de las paredes (así como las partículas de plasma que se difunden hacia las paredes) hasta regiones especiales, desde donde pueden bombearse fuera del sistema. Además de esta función de doble blindaje, los diversores y los limitadores ejercen otros efectos beneficiosos sobre el sistema de confinamiento, a saber, reducen significativamente las cargas térmicas de la primera pared, recirculan los isótopos de hidrógeno dentro del sistema y crean una capa refrigerante de las radiaciones en el borde del plasma que mantiene frío al plasma cercano a la pared y, por tanto, éste no podrá inducir una liberación significativa de materiales de las paredes.

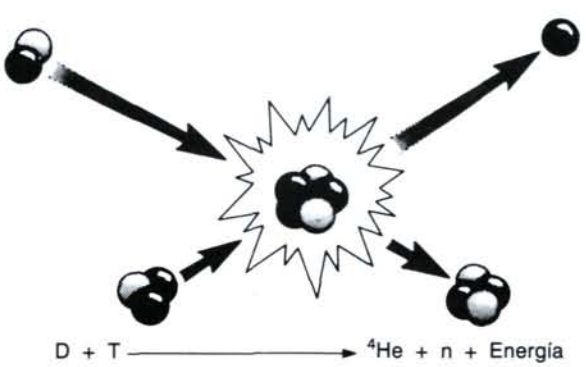


Dibujo artístico del Joint European Torus (JET), auspiciado por la Comunidad Europea.

El aprovechamiento óptimo de las funciones positivas de los limitadores y los diversores depende en gran medida de que se adapte el contenido de partículas atómicas del plasma límite, con inclusión de la composición de la primera pared, el limitador y los materiales de la chapa del diversor. La física atómica, que propicia este aprovechamiento óptimo, incluye una gran variedad de procesos de choque de átomos en fase gaseosa y de procesos de interacción de las partículas con la superficie. Estas partículas, presentes en los procesos del plasma límite en fase gaseosa, son los componentes básicos del plasma (electrones y núcleos de isótopos de hidrógeno), átomos e iones de las impurezas de las paredes (en una amplia gama de niveles energéticos) y especies moleculares como el hidrógeno, los óxidos metálicos y los

Investigaciones en materia de fusión

La perspectiva de utilización de la fusión radica en los 17,6 megaelectronvoltios (MeV) de energía que se liberan en una reacción de fusión D (T, ^{4}He)n y en la existencia del deuterio (D) en la naturaleza. Un reactor de fusión debe generar por sí solo el tritio necesario (T) en la capa fértil que rodea la cámara de reacciones por medio de las reacciones nucleares n(^{6}Li, ^{4}He)T y n(^{7}Li, n′^{4}He)T. El litio también abunda en la naturaleza. La viabilidad técnica de la fusión depende de que se confine un plasma D-T de alta temperatura ($\geq 10^8$K $\approx$ 10 keV)D-T y se le mantenga aislado de las paredes del recipiente el tiempo suficiente, para que las reacciones de fusión puedan producirse en una escala tal que ocurra la ignición del combustible termonuclear. La creación de la base científico-técnica para la ignición y combustión controlada del plasma de fusión ha sido el objetivo principal de las investigaciones en materia de fusión de los últimos cuarenta años. El confinamiento magnético de los plasmas de baja densidad ($\sim 10^{20}$ m^{-3}) y de alta temperatura (10 a 20 keV) es, en la actualidad, el principal concepto de esta investigación, que requiere tiempos de aislamiento térmico del plasma de alrededor de un segundo o más. Con arreglo a este concepto, la configuración magnética toroidal, conocida por tokamak, ya ha demostrado que se logran parámetros de plasma aplicables a las condiciones del reactor.



hidrocarburos, presentes en esta región debido a las bajas temperaturas de las zonas cercanas a la pared (5 a 50 eV). Los procesos de colisión inelástica que ocurren entre estos componentes del plasma son tan numerosos y complejos que predecir sus efectos combinados en la transformación de la energía del plasma y el transporte de partículas de plasma requiere un gran volumen de información sobre sus características de choque. No obstante, el efecto general de estos procesos se conoce de manera experimental: transforman la energía del plasma en radiación, por lo que constituyen un mecanismo de refrigeración que protege a las paredes de los flujos de temperaturas elevadas procedentes del núcleo caliente del plasma. Para optimizar la refrigeración de las radiaciones del plasma del borde hace falta una amplia base de datos sobre los procesos de colisión y radiación atómica y molecular.

Los procesos de colisión de los componentes del plasma con la superficie de los componentes materiales cercanos al plasma (la primera pared del reactor, los limitadores, las chapas de los diversores y otros) ejercen una influencia aun mayor en las propiedades del plasma del borde y, por medio de éste, en los parámetros generales del plasma. Estos procesos pueden traer consigo una enorme producción de impurezas del plasma y a ellos obedece, directa o indirectamente, la erosión de la primera pared y de otros límites materiales expuestos al plasma. Estos procesos tienen un carácter complejo y la información acerca de ellos es realmente limitada (en particular la relativa a los materiales de interés para la fusión).

La multitud de procesos atómicos de fase gaseosa y de la superficie que ocurren en la región del borde del plasma no sólo repercute directamente en el equilibrio energético del plasma y su confinamiento, sino también en la tecnología del reactor. Estos procesos (así como sus interacciones nucleares con los materiales del límite) provocan la erosión de la primera pared del reactor y, por consiguiente, tienen suma importancia para determinar los materiales que pudieran utilizarse para el reactor.

Otra esfera en la que la física atómica contribuye notablemente al desarrollo de la fusión es la del calentamiento de los plasmas de fusión. Los plasmas confinados por medios magnéticos requieren energía externa para alcanzar sus temperaturas de fusión. El calentamiento óhmico en los tokamaks puede elevar la temperatura del plasma sólo hasta algunos keV, nivel muy inferior al requerido. Hasta el presente, el método más eficaz para transferir energía desde fuentes externas al plasma es inyectar átomos energéticos de hidrógeno neutros al interior del plasma. A medida que las partículas neutras penetran en el plasma, se ionizan (al chocar con las partículas de plasma), quedan confinadas por el campo magnético y distribuyen su energía a los electrones e iones del plasma mediante los choques.

Todos los totamaks de grandes dimensiones que existen actualmente se calientan por medio de haces de partículas neutras de elevada energía (lo que se complementa con el calentamiento por ondas de radiofrecuencia), y se ha podido transferir al plasma energías de hasta 20 MW. El método de inyección de haces de partículas neutras también puede transferir al plasma gran cantidad de momento y, de esta forma, inducir en él un impulso de corriente no inductiva. Este impulso de corriente hace falta para mantener en funcionamiento a una máquina de fusión tokamak.

El método de calentamiento del plasma mediante haces de partículas neutras se basa casi por completo en los resultados de las investigaciones sobre física atómica. La eficacia del método depende de la intensidad de los iones extraídos de una fuente iónica, su neutralización en una celda gaseosa (luego de acelerarlos hasta alcanzar las energías requeridas), y su penetración y frenado en el plasma. En todas estas etapas de la producción y aplicación de haces, la física atómica desempeña un papel esencial: la optimización de la fuente iónica y la celda de neutralización son problemas tecnológicos que sólo pueden resolverse mediante un conocimiento adecuado de los procesos de colisión atómica. La transferencia de energía de los haces al plasma requiere también una información detallada sobre la ionización y otros procesos de los haces de átomos con las partículas e impurezas del plasma. La falta de datos atómicos necesarios para calcular la transferencia de energía del haz puede llevar a cálculos totalmente inadecuados de los parámetros del haz que se necesita y, en consecuencia, de la tecnología de producción de haces requerida.

Por último, una tercera esfera en que la física atómica participa activamente en las investigaciones en materia de fusión es la del diagnóstico del plasma. Para obtener una idea clara sobre las características físicas del plasma de fusión, es preciso medir muchos de sus parámetros (temperatura, densidad, energía, contenido de momento y otros), incluidas sus variaciones en espacio y tiempo a fin de poder controlar su comportamiento. La mayoría de los métodos de diagnóstico del plasma se basan en efectos propios de las partículas atómicas (iónicas) o derivados de sus interacciones. Los métodos espectroscópicos basados en la radiación de frenado y la radiación directa de impurezas de los componentes del plasma proporcionan una gran cantidad de información acerca de los parámetros fundamentales del plasma (las temperaturas y densidades de los electrones y los iones, su distribución espacial y sus variaciones en el tiempo) y acerca de la composición y distribución de las impurezas del plasma. Los métodos activos y pasivos de diagnóstico del haz atómico suministran información independiente o de otra índole acerca de la composición y los parámetros del plasma. Los métodos de diagnóstico del plasma requieren también un conocimiento muy exacto de las características de colisión y radiación de los componentes del plasma.

Los ejemplos antes mencionados se citaron para demostrar el panel que las investigaciones sobre física atómica han desempeñado y siguen desempeñando en el desarrollo de la fusión. Aunque circunscrita a las máquinas de fusión actuales, la física atómica aporta soluciones verdaderamente satisfactorias a aquellos problemas de las investigaciones en materia de fusión en las que desempeña un papel esencial (control de impurezas, tecnología de calentamiento del haz de partículas neutras y diagnóstico). La próxima etapa en el desarrollo de la fusión (construcción de los reactores experimentales) impone necesidades nuevas a las investigaciones sobre física atómica.

Cuestiones relativas a la física atómica en el desarrollo de los reactores de fusión

Desde que comenzaron a fabricarse los reactores de fusión, la física atómica ha ido adentrándose cada vez más en los aspectos tecnológicos de la fusión. No cabe duda de que las formas y los temas específicos de esa intervención experimentarán cambios y modificaciones a medida que evolucione la tecnología de la fusión. En consecuencia, conviene analizar el papel que ha desempeñado la física atómica en el desarrollo del reactor de fusión en el contexto del diseño de la próxima generación de máquinas de fusión, como el ITER. La física del quemado termonuclear del plasma, cuyo conocimiento cabal se incluye también en el programa de desarrollo de la próxima generación de máquinas de fusión, plantea asimismo algunos problemas para las investigaciones sobre física atómica. Algo parecido ocurre con el control del quemado termonuclear.

Una de las principales cuestiones que se tienen en cuenta en el diseño de la próxima generación de reactores experimentales de fusión es la selección de los materiales adecuados para la primera pared. Este problema tiene dos aspectos: uno relacionado con las propiedades termofísicas de la primera pared (estabilidad metalúrgica, transferencia de calor, daño por radiaciones) y otro relacionado con las condiciones del plasma del borde y el control de las impurezas. Ya se señaló anteriormente que las colisiones atómicas de fase gaseosa y de las partículas con la superficie determinan las condiciones del plasma del borde y ejercen una gran influencia en el contenido energético del plasma, su período de confinamiento energético y su estabilidad, así como en el funcionamiento de los diversores. En consecuencia, el control de las condiciones del plasma del borde es esencial para la explotación satisfactoria de un reactor de fusión termonuclear. El borde del plasma es la entrada al plasma central en reacción. Dado que existe una estrecha correlación entre las partes central y límite del plasma, las modificaciones en estas últimas se trasmiten rápidamente al núcleo del plasma en combustión. De ahí que el control de las condiciones del plasma del borde sea una manera de controlar el quemado termonuclear.

Es evidente que se necesita una amplia base de datos sobre los procesos atómicos de la fase gaseosa y de las partículas con la superficie para poder lograr el control de las condiciones del plasma del borde. Esta base de datos es aún bastante incompleta y para completarla se requieren importantes esfuerzos de investigación. Muchos físicos atómicos y otros especialistas en los fenómenos de la superficie participan actualmente en la obtención de la base de datos requerida.

Los procesos que ocurren en el plasma del borde no sólo influyen en la ignición y el quemado termonuclear del plasma, también determinan los índices de erosión de los materiales cercanos al plasma y, en consecuencia, su vida útil. La tecnología de la primera pared del reactor debe dar solución también al problema de la erosión rápida que provocan los procesos de interacción de la pared con el plasma.

Otro de los aspectos concretos del control de las condiciones del plasma del borde es la expulsión de las cenizas termonucleares. Las partículas alfa de 3,5 MeV que se generan en las reacciones de fusión D-T desempeñan un papel importante en el suministro de energía al plasma después de la ignición, para mantener el proceso de combustión. Luego de la termalización, la presencia de partículas alfa "frías" en el plasma diluye el combustible termonuclear y hay que eliminarlas constantemente de la zona de la reacción.

Afortunadamente, estas partículas alfa se difunden hacia el borde del plasma, desde donde es posible dirigirlas, junto con las demás impurezas de la pared, hacia la cámara separada del diversor y desde ahí bombearlas fuera del sistema. Los procesos atómicos de la fusión de las partículas alfa con otros componentes del plasma (en particular con iones de las impurezas) pueden ejercer una gran influencia en su termalización en la zona de reacción y su eliminación de la cámara principal. En este caso también hace falta una amplia base de datos atómicos para predecir y controlar la expulsión de cenizas de helio.

El diseño y la tecnología de los diversores magnéticos requiere una cantidad particularmente grande de datos sobre la interacción de los átomos y el plasma con la superficie. Las chapas de los diversores deben ser capaces de soportar flujos de calor y de partículas de plasma varias veces superiores a los que llegan a la primera pared de la cámara del reactor. Si las chapas y la cámara del diversor no tienen un diseño adecuado el material puede sufrir una grave erosión. Además de la elección adecuada de los materiales de la chapa, en el diseño de los diversores se debe prever la inclusión de un régimen de explotación con una intensa recirculación de hidrógeno entre las chapas y el plasma cercano con miras a producir un plasma frío de alta densidad cerca de las chapas. En estas condiciones las cargas de calor y del flujo de partículas en las chapas de los diversores se reducen drásticamente, al igual que los índices de erosión. A fin de mantener el alto régimen de recirculación alrededor de las chapas, también deberá ser sumamente alto el ritmo de bombeo de la cámara del diversor al exterior. El transporte de energía y de momento mediante el gas neutro (acumulado en la cámara del diversor debido al proceso de recirculación, con densidades superiores a la del plasma) supone una gama amplísima de procesos atómicos y de superficie, cuyos datos se requieren para predecir los efectos de este transporte.

Otro importante aspecto tecnológico en el desarrollo de los reactores de fusión es el del calentamiento del plasma. En el concepto actual del ITER se prevé el calentamiento del plasma del núcleo del reactor mediante poderosos haces de deuterio, con una energía aproximada de 1 MeV. En párrafos anteriores se analizó cómo la energía exacta del haz se determina por los niveles requeridos de transferencia de energía al plasma y el impulso de corriente inducida por la transferencia de momento. A energías tan elevadas, la atenuación del haz depende de una diversidad más amplia de procesos de colisión (con haces de átomos excitados) que en el caso de las partículas neutras de 100 a 200 keV de energía, que se utilizan actualmente en los tokamaks de gran tamaño. Los efectos de las excitaciones de los haces de átomos pueden aumentar la sección eficaz del frenado del haz por un factor de dos e imponer de este modo nuevas exigencias a la tecnología de los haces neutros. La producción de haces intensos de partículas neutras en

la gama de energía del orden de los MeV debe basarse en las fuentes de iones negativos cuya eficacia es aún insuficiente. En este caso también, las colisiones de los átomos, las moléculas y la superficie determinan la física de estas fuentes iónicas y para su desarrollo tecnológico es menester una amplia base de datos sobre estos procesos.

El programa de física atómica del OIEA relacionado con la fusión

Además de servir de marco para la colaboración internacional en las investigaciones sobre fusión (como en el Taller sobre el INTOR y las actividades de diseño conceptual del ITER) y de organizar la Conferencia Internacional bienal sobre investigaciones en materia de física del plasma y fusión nuclear controlada, el OIEA cuenta con sus propios programas relacionados con la fusión en las esferas de la física del plasma, la física nuclear, la física atómica y molecular y la tecnología e ingeniería de la fusión. Asimismo, el Organismo publica la revista internacional *Fusión Nuclear*, el *World survey of activities in controlled fusion research* (cuya primera edición apareció en 1986 y la segunda está ahora en fase de preparación) y otras publicaciones que han emanado de las reuniones y simposios científicos organizados por el OIEA en la esfera de la investigación en materia de fusión. La finalidad de los programas concretos del Organismo es brindar a los especialistas un foro para examinar los últimos adelantos y los problemas actuales de los distintos campos de la investigación y la tecnología de la fusión. Por medio de algunas becas y contratos de investigación, el Organismo también presta asistencia directa a los Estados Miembros en sus programas nacionales de investigación sobre fusión. El órgano consultivo para los programas del Organismo relacionado con la fusión es el Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF).

El programa del Organismo relacionado con los aspectos de física atómica de las investigaciones sobre fusión comenzó en 1976 con el establecimiento de un programa de datos atómicos y moleculares relativos a la fusión en la Sección de Información Nuclear de la División de Ciencias Físicas y Químicas, dirigido por la subcomisión del CIIF sobre información atómica y molecular relativa a la fusión. El programa del Organismo en esta esfera recibió su orientación inicial de un grupo consultivo que celebró una reunión en Culham (Reino Unido) en 1976, organizada específicamente para determinar las necesidades de información atómica y molecular a corto y largo plazos en la investigación sobre fusión. Actualmente los principales objetivos de las actividades del OIEA en materia de información atómica y molecular son:

- establecer y mantener una base internacional de datos atómicos y moleculares evaluados y recomendados relativos a la fusión;
- coordinar y apoyar la creación de una base internacional de datos atómicos y moleculares relativos a la fusión (en particular mediante la coordinación de actividades de compilación y evaluación realizadas en los centros nacionales de datos atómicos y moleculares sobre fusión);
- establecer, mantener y publicar una base internacional de datos bibliográficos relativos a la fusión;
- promover y apoyar la producción de datos atómicos y moleculares relativos a la fusión mediante contratos de investigación del OIEA y programas coordinados de investigación, y de otras relaciones pertinentes con la comunidad de los físicos atómicos, y
- difundir datos atómicos y moleculares evaluados entre los laboratorios de fusión y otros usuarios.

El OIEA persigue estos objetivos en estrecha colaboración con una red internacional de centros de datos atómicos y con la amplia participación de una gran parte de la comunidad de los físicos atómicos y de los sectores correspondientes de la comunidad de especialistas en fusión.

Se ha logrado un adelanto considerable en el establecimiento de la base de datos atómicos y moleculares evaluados relativos a la fusión, que ahora contiene datos representativos recomendados para todos los procesos de colisión de los componentes básicos del plasma de hidrógeno. Existen asimismo conjuntos completos o casi completos de datos relativos a colisiones y radiaciones relacionados con las impurezas del plasma más importantes (carbono, oxígeno y hierro) y, en el caso de los procesos de ionización, para todos los átomos e iones que participan en la fusión. Los datos se presentan en un formato que permite utilizarlos fácilmente en los programas de computadoras aplicados a la fusión. La compilación y evaluación de los datos se coordina por medio de la red de centros de datos atómicos y moleculares, mientras que su validación y recomendación está a cargo de grupos de expertos seleccionados internacionalmente. La base de datos de física atómica del OIEA relacionados con la fusión se está ampliando ahora en el campo de los datos sobre interacción del plasma con la pared. En la etapa actual, sólo se incluyen en el programa los procesos más fundamentales de interacción de las partículas con la superficie. Sin embargo, se prevé la ampliación de estos trabajos para que abarquen también datos sobre fenómenos más complejos que tienen lugar en las interacciones del plasma con el material, incluidas las propiedades de los materiales expuestos a un gran calor y a flujos intensos de partículas.

El actual programa de física atómica del OIEA relacionado con la fusión se centra en la terminación de las bases de datos atómicos y moleculares necesarias para elaborar los modelos y para los diagnósticos relativos a los plasmas del borde de los grandes tokamaks, el transporte y la radiación de impurezas de Z mediano y alto, la penetración de haces neutros de deuterio de elevada energía (1 a 2 MeV) en plasmas propios de reactores, así como para establecer una base de datos de los procesos fundamentales de interacción de las partículas con la superficie. Dicho programa integra los esfuerzos del personal de la Sección de Datos Nucleares del OIEA y de la red de centros de datos atómicos y moleculares, así como de muchos laboratorios nacionales de física atómica y de física de la superficie. Este espíritu de cooperación internacional sigue propiciando la creación de una base internacional de datos atómicos y moleculares recomendados y de información sobre interacción del plasma con la pared relacionados con la fusión.