

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 1988 - 1989

LEIDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 19 DE OCTUBRE 1988

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. FELIPE CALVO CALVO

SOBRE

"ANTIGUAS ARTES, NUEVAS TECNOLOGÍAS"



M A D R I D
DOMICILIO DE LA ACADEMIA
VALVERDE, 22 - TELÉFONO 521 25 29
1 9 8 8

ANTIGUAS ARTES, NUEVAS TECNOLOGIAS

Excelentísimos e Ilustrísimos señores
Señoras y Señores

El discurso que he compuesto por amable invitación de la Academia necesita una introducción. Debo explicar por qué el tema, por qué el momento y por qué esta Academia.

POR QUE EL TEMA

Las *artes* a las que voy a referirme están en la raíz del conocimiento, son las artes de *hacer*. Detrás de lo hecho está la manera. Cosas y maneras son los términos de la ecuación que, con el coeficiente del talento, conducen al conocimiento. Y de eso se ha tratado siempre, de conocer. Por eso es oportuno recordar cómo, empezando desde el principio. Y en ese principio están las manos junto a la cabeza. Pero la soberbia del momento está desviando nuestra atención a la cabeza; pensar y hablar, sin hacer, es uno de los fraudes tecnológicos, su último grito, el “parlógrafo” la versión tecnológica del parlador.

Las manos, les decía, son las grandes postergadas; las manos para crear obrando. Esas manos para el talento son las que quisiera traer a vuestra consideración en este discurso. Acaso influya también que cobran especial valor nuestras extremidades cuando se nos van quedando atrás, cuando ya se niegan a seguirnos, cuando la edad, o lo que sea, hace de las manos torpes garras. Ello nos trae al recuerdo una reflexión escrita hace tiempo: “Pero un día cualquiera entre un millón de años, al hombre, criatura de Dios, estando, quizá, en el fondo de la cueva, se le ocurrió mirar una de sus manos. Comenzó a moverla lentamente, a probar todos sus movimientos. Tenía ante sí, aunque era difícil que lo sospechara, el instrumento más perfecto y delicado de toda la naturaleza; la máquina más poderosa que ha podido soñarse. Nada podría serle negado a aquella herramienta, desde una caricia hasta la posibilidad de trastocar la faz de la Tierra y completar así la Creación. Y empezó la Cultura”.

Este homenaje a las *artes* - maneras como se hace o debe hacerse una cosa - que quiero hacer desde esta tribuna, es, creo yo, especialmente oportuno y especialmente significativo. Oportuno porque estamos en la era de la rutina, con más botones y dígitos de cristales líquidos, que herramientas; nos estamos quedando mancos, perdiendo habilidad para crear. Se ha degradado el experimento haciéndole automático para rendirse a la economía del tiempo robado a la observación atenta. Los modernos pseudocientíficos se sientan ante consolas donde parpadean unos puntos luminosos y en su soberbia no solo no sienten la necesidad de entender lo que allí pasa, sino que se enfadan si su moderno esclavo no les obedece porque se ha interrumpido un circuito. o les replica con un mensaje en verde que le dice: “te has equivocado, muchacho”. Se acabó el artesano del latón, el estaño y la caoba; sus bellas creaciones, que están en la base de las nuevas tecnologías, han pasado del laboratorio al Rastro o a las salas de subasta, cuando no han sido destrozados en los pasillos de nuestras Facultades experi-

mentales por los nuevos bárbaros que pretenden progresar a golpe de desprecio, ignorando que, como reza un proverbio ruso, lo mejor de lo nuevo es, con frecuencia, el largo pasado olvidado. Y es significativo porque, hecho por nosotros, constituye una denuncia y un ejercicio de humildad, un reconocimiento a quienes tanto hicieron por *arte*, de manera inexplicable, sin saber o poder comprender lo ocurrido. Cuantas veces, después de un experimento no nos hemos preguntado ¿por qué?, y cuantas hemos soñado con cosas que nunca fueron y nos hemos preguntado ¿por qué no?.

Naturalmente el discurso aunque de carácter general se apoyará en unos pocos ejemplos concretos relacionados principalmente con la metalurgia, y ello por dos razones: primera, porque, como sabeis, los metales han ocupado mi vida académica; y segunda porque las *artes* relacionadas con los metales son muy antiguas, muy variadas, han evolucionado de forma continua hasta las nuevas tecnologías, sin desprenderse de las cualidades de los elementos aristotélicos agua, aire, fuego y tierra. Me gustaría que este discurso sugiriera otros trabajos con el mismo propósito, referidos a otras *artes* en los campos de la agricultura, la alimentación, el transporte, la navegación, la construcción, la minería, etc.

La mayor parte de las nuevas tecnologías tienen sus raíces en la superficie del tiempo aunque son muy profundas en el conocimiento; es decir se apoyan en *artes* relativamente recientes desarrolladas desde el siglo XVIII cuando se introdujo el *gran arte* de experimentar. Por eso me voy a referir también a las *artes* que condujeron a la ciencia básica de la materia.

POR QUE EL MOMENTO

No estoy seguro de que la sociedad esté pasmada ante las nuevas tecnologías que utilizaban, doblegándolas, las propiedades de la materia del cosmos científicamente interpretadas. Ni se puede asegurar que a esta sociedad la conmueva demasiado el descubrimiento de las siempre penúltimas partículas donde se produce la gran identificación materia-energía. Más bien habría que decir que la gusta *usar*, demanda lo que se ha dado en llamar bienestar y quiere recibirlo ya como si fuera un derecho constitucional; se monta - literalmente - en la maravilla tecnológica de un Concorde con la naturalidad que lo pudiera hacer en un jumento (si quedarán jumentos) y escucha sin inmutarse que una embarcación que compite en la Olimpiada lo hace con un casco *tradicional* de fibra de carbón.

Sin embargo, ningún hecho socio-cultural condiciona tanto el futuro de la sociedad en todos los aspectos, como la fecundación de las antiguas *artes* por el conocimiento científico, fecundación que ha producido ese fenómeno para la producción y el consumo - aunque no siempre para el bienestar - que se ha divulgado con el nombre de *nuevas tecnologías*.

La Humanidad tendrá que adaptarse a este hecho y replantearse seriamente, entre otras cosas, el problema trivializado de la convivencia de sus pueblos, cada vez, paradójicamente, más amenazada cuando, por las más manipuladas de esas nuevas tecnologías, estamos todos más próximos, mejor dicho, más aproximados. Más de 160 naciones-estado proclaman y rinden culto a su soberanía pretendiendo ser dueñas de su destino. Arnold Toynbee se refirió a ello diciendo: "El culto a la soberanía ha pasado a ser la religión más importante".

A pesar de todo, ¿cómo se ha llegado adonde estamos?. Pues acumulando experiencia, profundizando en el conocimiento del mundo real, elucubrando. Proceso contínuo, aunque accidentado, desde que la inteligencia se abrió camino en su medio; disponiendo, observando, obteniendo, repitiendo, interpretando y comunicando.

Es el apasionante quehacer de la investigación, desacompasado, paradójicamente, con la educación.

El cambio ha sido tan profundo y desconcertante que unos huyen hacia el pasado en tanto que otros quieren sintonizar con el mañana - tan incierto como difícil de evitar - que se alcanzará con el esfuerzo desproporcionado de unos pocos - relativamente pocos - equipados con el poder del conocimiento científico.

Los responsables políticos en España tienen conciencia del problema, y se han hecho análisis más o menos ajustados a la realidad - más bien menos - que ha acabado en una serie de disposiciones administrativas que desarrollan la Ley de Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica, para acabar - o empezar - con un Plan Nacional para la Investigación Científica y el Desarrollo Tecnológico.

La Ley pretende haberse inspirado en las recomendaciones de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CNUCTD Viena, agosto, 1979), una de las cuales dice: "Los componentes de ciencia y tecnología deben incluirse en los planes o estrategias de desarrollo nacional como instrumentos básicos para alcanzar los diferentes objetivos y metas que dichos planes o estrategias contienen; dichos planes también deben incluir los requisitos concretos a nivel sectorial e intersectorial para generar, dominar, transmitir, adquirir, definir localmente, asimilar y utilizar la ciencia y la tecnología, incluídos los conocimientos prácticos".

Una vez más, se dice, España trata de recuperar el tiempo perdido y se afirma que "en términos históricos", se avanza con éxito, venciendo "lastres y rigideces derivados de sistemas anticuados de pensamiento y de organización social". Se pretende "superar la burocratización, la pasividad, el proteccionismo injustificado, la inadecuación de los sistemas de enseñanza y de la organización de la investigación y olvidar una cierta filosofía abandonista y anticientífica que propone que sean los demás los que inventen". Se habla de la revolución tecnológica como esencialmente, una nueva forma de hacer y de pensar, basada en los procesos de tratamiento de la información que, en último término, remiten a la capacidad cultural de una sociedad para generar ideas y desarrollar códigos de comunicación" (?). No se aclaran las ideas cuando se lee que "el sedimento cultural suscitado por una rica civilización puede transformarse en fuentes de creatividad informacional", y que hay que lograr que "nuestra identidad cultural se refuerce mediante una forma propia de construcción de la modernidad tecnológica", y que hay que dar por abierta "la posibilidad histórica de hacer directamente productivo el trabajo intelectual, superando uno de los fundamentos esenciales de la división social del trabajo y, por ende, de la reproducción de la desigualdad social (?).

Pura retórica en jerga socio-política para introducirnos en un libro bajo el

título: "El Desafío Tecnológico, España y las Nuevas Tecnologías".

Algo más claro es el planteamiento, - también sociopolítico - del problema en el seno de las Comunidades Europeas. Los cambios que venía comentando, el enriquecimiento científico-técnico es tan rápido que resulta muy difícil tener una idea clara de lo que la grande y compleja sociedad europea - plurinacional aún por muchos años a pesar de la unidad de ciudadanía del Acta Unica - va a ser en los primeros años del siglo XXI. Por ello se puso en marcha hace ya diez años el programa prospectivo conocido como FAST (Forecasting and Assessment in Science and Technology). Con él se pretende: 1) favorecer el renacimiento tecnológico europeo; 2) saber cómo tratar los cambios producidos en el empleo como consecuencia de las nuevas tecnologías; 3) actuar en política teniendo en cuenta la creciente internacionalización de la ciencia, de las tecnologías y de las empresas; 4) mejorar las condiciones de vida de los europeos en materia de salud, nutrición y medio ambiente; 5) algo tan importante, como difícil, que es poner en práctica la gran idea de que la ciencia y la tecnología puedan colaborar desde Europa en el desarrollo de los países del tercer mundo que tan solo dentro de diez años, representarán las 4/5 partes de la población mundial, es decir 4.000 de los 5.000 millones de seres humanos que ya somos.

Pero este programa prospectivo (FAST) no va a ser determinante de un desarrollo orientado que en ciencia se escapa a la burocracia político-administrativa.

Lo que se ha dado en llamar nuevas tecnologías es la consecuencia de conjugar el conocimiento Científico básico con las necesidades o comodidades socioeconómicas o las obligaciones de Estado, y ello aderezado con el prestigio de escuela o de nación que a las *Patrias* corresponde defender o acrecentar, que son estímulos que tienen algo que ver con los que ponen en marcha cuando se participa en una Olimpiada.

La excelencia universitaria que debe producir la ciencia básica, debe hacer compatible este progreso, este desarrollo, sin menoscabo de la ética, del goce espiritual, cuidando la educación por encima del conocimiento, frenando el materialismo desbocado, el proteccionismo, el igualitarismo por la mediocridad, dejando sitio a la saludable competencia en el esfuerzo individual; seleccionando para que los mejor dotados, o los más capacitados, o los mejor equipados, trabajen más y mejor para todos, y que estos *todos* les reconozcan el esfuerzo, no les discutan el mérito.

Parece, pues, que este es el momento de reflexionar sobre *artes*, ciencia y tecnología.

POR QUE LA ACADEMIA

Esta Real Academia se creó por R.D. de 25 de febrero de 1847 para "atender especialmente a la cultura y bienestar de los pueblos que rige la Corona, promoviendo con preferencia la rama del saber en las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que tan poderosamente influyen en la industria y prosperidad de las Naciones".

Aunque las Universidades pudieran estar dotadas de los medios necesarios para cultivar las dichas ciencias y producir un desarrollo rápido y provechoso, se creyó indispensable acudir a otros medios no menos eficaces que en países extranjeros

habían contribuído, y siguen contribuyendo poderosamente, al engrandecimiento de aquellas ciencias y a la importancia de sus aplicaciones de toda especie.

No bastan los esfuerzos aislados de los sabios - se decía - que a tales estudios se dedican, para recoger todos los óptimos frutos de un campo tan vasto que en él se pierde la inteligencia humana, sino que era necesario que aquellos que se reunieran para conferenciar entre sí, comunicarse sus observaciones, auxiliarse mutuamente y, por último, establecer extensas correspondencias con los sabios y las Corporaciones más eminentes del Orbe, a fin de que este inmenso comercio de ideas y descubrimientos difundiera el saber por todas partes y acrezca el tesoro de la ciencia con los tributos que todos le lleven a porfía". Si las Sociedades puramente literarias habían hecho grandes servicios, no les cedían las científicas en utilidad e importancia, y aún podían aventajarlas, porque "el estudio de la naturaleza requiere, más todavía que el de las lenguas y otras ciencias, los esfuerzos reunidos de muchos hombres que se dediquen de consumo a arrancarle sus secretos".

Desde mucho antes (1580) - que es antes de las famosas Sociedades de París y Londres - existió en Madrid una Academia Real de Ciencias, de la cual fueron miembros algunos Grandes y Títulos de Castilla. Después de otros proyectos que fracasaron, se creó la Academia Matritense de Ciencias Naturales (1834), no en muy favorables circunstancias, y sin medios para cumplir debidamente con sus fines, pedía auxilio y recursos que le dieron nueva vida y le permitieran ser lo que era dado esperar de la ilustración de sus individuos.

Trece años después (1847) aquellas tan tempranas inquietudes tomaban forma definitiva en esta Real Academia, creada para cultivar el estudio y propagar el conocimiento de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales "en su esencia y en sus principales aplicaciones", con el compromiso de "asesorar al Gobierno en los temas de su competencia singularmente en los de política científica que puedan tener transcendencia en el desarrollo científico y tecnológico del País".

Precisamente por esto, por propia iniciativa, ofreció en Septiembre de 1983 un informe sobre Política de la Ciencia y la Tecnología, redactado después de varias sesiones monográficas a las que fueron invitadas a participar personalidades de la investigación y de la industria. El momento para emitir aquel Informe era especialmente indicado no sólo por la importancia intrínseca de la investigación, sino por la necesidad ampliamente reconocida de potenciar y adaptar nuestro actual sistema científico tecnológico a los requerimientos que de ello se derivan.

Por otra parte, en 1938 se creaba el Instituto de España constituido por el conjunto de los Académicos Numerarios de las Reales Academias, "reunidos en Corporación Nacional a título de Senado de la Cultura Española". Entre las funciones de este Instituto, además de las que pueda encomendarle el Estado, figura la de ser "el órgano a través del cual el Estado orientará y dirigirá la alta cultura y la investigación superior de España".

La Royal Society de Londres al presentar su nueva publicación anual (1986) *Science and Public Affairs* decía que esta publicación estaba concebida para

llamar la atención pública sobre las posibles consecuencias de nuevos descubrimientos y nuevas aplicaciones de los viejos y los nuevos conocimientos; es tarea urgente, dice, mostrar cómo la ciencia y la tecnología impregnan la vida de los no científicos. Ello refleja el reciente cambio de aquella venerable y prestigiosa Sociedad hacia la ciencia aplicada, poniendo énfasis en uno de sus propósitos iniciales: "promover por la autoridad de los experimentos las ciencias de las cosas naturales y de las artes útiles".

Como por otra parte soy miembro del Senado de las Cortes Generales, y tengo la senaturía de la edad por jubilación anticipada, y cuento con la venia de esta Real Corporación, en la que formo parte de su Comisión de Historia de la Ciencia, he-me aquí, creo yo, legitimado para hablarles a Vds. desde esta tribuna de lo que me he propuesto.

LAS ARTES DE HACER

En un poema de Rilke se lee que el hombre no necesita cantar a los angeles la gloria de Dios; los angeles la conocen mucho mejor que aquél. Pero el hombre pudiera distraer a los angeles si les contara cómo funde menas, cómo hace cerámica, cómo teje, cómo construye tantas cosas hermosas y útiles. Y esto es lo que va a tratar de hacer este hombre que les habla para distraerles a Vds. un rato.

El cómo se han hecho las cosas constituye gran parte de la prehistoria de toda la maravillosa estructura del pensamiento y de las civilizaciones. Los historiadores de la ciencia, dice Cyril Stanley, Smith están obsesionados con la historia de las ideas y el papel que jugaron los grandes hombres en su formulación. La historia de la ciencia pasa así a ser una rama de la historia social. Pero la ciencia tiene sus propias convulsiones que son más importantes para su ser que el medio en que florece y se desarrolla. Es verdad que hay una influencia recíproca ciencia-sociedad de la que ya habló mi maestro el Prof. Jimeno; recíproca, pero no equivalente. El historiador interesado en esta influencia recíproca haría bien en ocuparse de las *artes* olvidadas o menospreciadas que subyacen en la historia de la ciencia.

La historia de la ciencia como esfuerzo intelectual no puede ser entendida sin estudiar la influencia extracientífica de la sociedad, pero tampoco puede serlo sin prestar más atención a los precursores no estrictamente intelectuales. La historia de las *artes* es aún más interactiva con la historia social que lo es la de la ciencia. Aquella historia empieza con la experiencia personal de un ser humano que se ocupaba con materiales y artefactos. Para reconstruirla e interpretarla ha habido que esperar a otras fuentes que las verbales; el acceso cada vez mayor a testimonios tangibles - utensilios y artefactos - de origen arqueológico o reciente, determinará que las *artes* ocupen su espacio en la investigación histórica.

La historia de las *artes* y la historia de la ciencia deberían ser enseñadas e investigadas en Escuelas y Universidades. Esa historia unificada arroja luz sobre la conducta de los seres humanos y subyace en los cambios sociales. Al científico le muestra cómo los grandes momentos, en los que tuvo lugar una rápida ampliación del conocimiento, están relacionados con una precedente experiencia empírica sobre fenómenos y procesos que se descubrieron y practicaron más por *arte* que por *lógica*. Al historiador le serviría para sintonizar mejor, para resonar, con una sociedad en tiempo pasado e interpretar los hechos que él deduce de fríos documentos

o de aspectos culturales materializados en la forma, en la decoración o en el uso, llegando a establecer cómo fueron vividos en su día; aprendiendo a leer lo evidente en la estructura de los objetos o en su tratamiento, que reflejan la actitud sensual de los hombres que los conformaron.

Los historiadores convencionales se han interesado por aspectos y episodios de la ciencia formal sin mencionar al hombre cargado de conocimientos adquiridos en el ejercicio de sus *artes*, y los científicos, legítimamente orgullosos de sus éxitos, han subestimado la contribución de las anteriores *artes* y sobreestimado el valor práctico de la teoría.

Las *artes* fueron y son una experiencia esencialmente humana, condicionada, sensual e intelectualmente, con la que el hombre ha tratado de satisfacer necesidades o gustos. El artesano, lejos de ser un destructor de valores humanos fue, y suele ser aún, su mejor ejemplo motivado por destellos de belleza, de provecho o de servicio a la humanidad. Estudiar la evolución de sus oficios desde las más primitivas ocupaciones del hombre a su actual estado, es mucho más importante para discurrir sobre el futuro que los populares informes sociológicos sobre los marginados, tan queridos de novelistas y productores de películas. Porque creo que es necesario incorporar a las "humanidades" la historia de las *artes* y porque creo que ello así conviene también a las "ciencias" me he decidido a escribir este ensayo. He buscado y encontrado argumentos para esta tesis en mi campo, el de los metales.

Permítanme recordarles que el oro, la plata y el cobre son metales cinco veces milenarios. El bronce nada menos que cuatro. A través de los objetos encontrados hechos con estos metales se puede apreciar muy bien la notable pericia (sabiduría, experiencia y habilidad en una ciencia o arte) de los metalurgos de las civilizaciones egipcia, griega, romana, o moche, por ejemplo. De esta pericia poco o nada quedó escrito; los aspectos técnicos han tenido que deducirse estudiando, como queda dicho, los objetos o los artefactos.

Los autores griegos (Aristóteles, Theophrasto, Diodoro Sículus, Discorides) sólo mencionan minerales, y discuten su origen, naturaleza y uso en medicamentos. Los autores romanos son algo más explícitos y sus escritos más interesantes para nuestro propósito. Plinio el Viejo, por ejemplo, en su enciclopédica Historia Natural, informa sobre aleaciones de oro, sobre el latón, sobre los que hoy llamamos sueldas (aleaciones de metales, blandos) y sobre otros productos metálicos. Aunque es evidente y lógica su falta de experiencia personal en muchos aspectos de lo que escribe, su obra es una referencia fundamental para los historiadores de la metalurgia. Al fuego, elemento esencial para el *arte* le dedica el siguiente párrafo:

"Al terminar nuestro examen de la forma cómo la inteligencia humana acude al *arte* para imitar a la naturaleza, no podemos sino maravillarnos del hecho de que el fuego es necesario para casi todas las operaciones. Toma las arenas de la tierra y las funde, ya en vidrio, ya en plata, ya en minio o en uno u otro plomo, o en alguna sustancia útil al pintor o al médico. Por el fuego los minerales se desintegran y se obtiene cobre; en el fuego nace el hierro y por el fuego se subyuga; por el fuego se purifica el oro; por el fuego se queman las piedras para levantar las paredes de las casas ... El

fuego es el elemento inconmensurable, incontrolable, con respecto al cual es difícil decir si consume o produce más”.

ARTES DE DORAR

Pero Plinio no necesitó el fuego para describir el arte de dorar cobre en frío. El estudio de los caballos dorados que hay en la Basílica de San Marcos en Venecia condujo a una investigación sobre las técnicas de dorado utilizadas en la antigüedad. Los citados caballos están moldeados en cobre que no es precisamente el metal más adecuado para el moldeo. El empleo de cobre puro en estos caballos, y en otros artefactos de la época clásica, se debió a que los artesanos del dorado utilizando mercurio encontraron dificultades cuando trataban de dorar sustratos de plomo o de bronce. Las instrucciones que Plinio da para el dorado en frío pueden resumirse en las siguientes operaciones:

- 1) Se frota mercurio sobre la superficie del cobre en frío. En esta operación algo de cobre se disuelve en el mercurio formando una película muy fina de amalgama.
- 2) Se limpia el exceso de mercurio si lo hubiera, con lo cual la superficie queda como un espejo.
- 3) Se presiona una lámina de oro sobre la superficie así preparada. El oro absorbe algo de mercurio en su contacto pero no se ablanda ni se desintegra y queda firmemente adherido al sustrato.
- 4) Una vez dorado el artefacto no se calienta. El mercurio se elimina con el tiempo por difusión a través del oro.

El *arte* no puede ser ni más simple, ni más económico y ni más eficaz. ¡Ni más temprano!.

Este dorado en frío sobre cobre admite el bruñido. No así el dorado sobre bronce porque la amalgama de estaño resulta ser frágil y se levanta el oro. Es decir, el empleo del cobre como material base en el arte de dorar en frío según la técnica descrita por Plinio, no fue un capricho o un azar, se eligió por razones técnicas. Los objetos que no se pensaban dorar se moldeaban en aleaciones de cobre, estaño y plomo que reproducen mejor que el cobre. Dice la historia que Nerón quiso que se dorase una estatua de bronce de Alejandro el Grande, y Plinio se refiere a este caso diciendo que el oro se levantó y que la estatua quedó mucho mejor cuando perdió el dorado aunque presentaba algunas incisiones en las que el oro se había sujetado. Esta observación de Plinio puede interpretarse como una prueba de que también se practicó el llamado “dorado mecánico” incrustando láminas de oro en una superficie previamente rayada cuando el sustrato no admitía el dorado en frío por mercurio. Se trata del antecedente del trabajo de ataujía, que aún se practica primorosamente en Toledo.

El dorado al fuego se desarrolló mucho después. También presentó dificultades cuando se trató de aplicar a aleaciones Cu-Sn-Pb, pero los artesanos supieron superarlas, y hay muchos ejemplos de obras de arte hechas de varias aleaciones dora-

das al fuego por mercurio; sin ir más lejos la famosa estatua ecuestre de Marco Aurelio en el Capitol Romano. Benvenuto Cellini describió detalladamente este procedimiento en su obra "I Trattati de l'Oreficeria e della Scultura" (Florencia, 1568).

En el otro Mundo, aún por descubrir, se practicaba curiosamente una técnica muy distinta para el *arte* de dorar o platear. No se conocía el mercurio - como tampoco se conocía el hierro - aunque sí se utilizara su mineral el cinabrio (limpe) en cosmética. Pero el oro ("sudor del sol") y la plata ("lágrimas de la luna") eran allí también metales para el culto, para el arte, para el poder, para la ostentación, e incluso para el fraude. Acaso por eso los habitantes de aquel continente estuvieron atentos a la peripecia de estos metales.

Las culturas que allí más contribuyeron al desarrollo de las *artes* metalúrgicas fueron las más antiguas. La cultura *chavin* (800-400 a.de C.) ocupó las tierras altas de Perú; la cultura *moche* (100 a. de C. a 800 d.de C.) ocupó los valles que desembocan en la costa norte del actual Perú; y la cultura *chimu* (1150-1476 d.de C.) se extendió desde el país de los *moche* hasta lo que hoy es frontera con Ecuador. Los *incas* emplearon en Cuzco a los orífices y plateros *chimus* dominados, pero los *moche* habían sido realmente los artesanos más virtuosos y no fueron superados por ninguna cultura posterior. La característica principal y distintiva de la metalurgia andina fue el trabajo con láminas que luego se decoraban por repujado, no el moldeo. A la pieza del tamaño deseado se llegaba en ambos Mundos uniendo por presión en frío las láminas batidas; la nobleza del oro y de la plata explican esta temprana forma de unión precursora de la nueva tecnología de la soldadura en estado sólido.

Ya hace años se descubrió en Perú el yacimiento arqueológico de Loma Negra. La mayoría de los objetos encontrados están hechos con láminas de cobre batido; al limpiarles se encontró que habían estado recubiertos con una fina capa de oro o plata. Dada su perfección bien podría haber parecido que hubiesen sido de oro o plata macizos. El estudio metalográfico reveló varios hechos: 1) el recubrimiento era de un espesor muy pequeño y uniforme; 2) había entre el recubrimiento y el sustrato una zona de transición que hoy sabemos producida por difusión en estado sólido, lo cual significaba, dada la naturaleza de los metales identificados, que en algún momento de su trabajo se había aplicado calor a los objetos; 3) nada de lo observado permitía pensar en que se hubiera aplicado alguna técnica de las conocidas en Eurasia (amalgamación, panes de oro, inmersión en oro fundido, laminado conjunto cobre-metal noble, etc.). Se trataría de un procedimiento nuevo, para el que los hechos anotados permitían pensar que fuera de carácter químico.

El batido de láminas de metal pudo haber conducido a su original y sorprendente arte de dorar y platear. Golpeando adecuadamente las aleaciones Cu-Au, ó Cu-Ag ó Cu-Au-Ag pueden extenderse en forma de láminas, pero el metal endurece al trabajarlo en frío, se hace "agrio" y quebradizo. Para poder seguir trabajándole el metalurgo tenía que recocer la pieza calentándola al rojo. Así se recupera por recristalización, su maleabilidad.

La aleación andina más antigua era de cobre y plata. Estas aleaciones son maleables y toleran el repujado que, además de decorar, permite conservar la forma debido a la rigidez que introduce. Batida en exceso, agotada su maleabilidad, la lámina recupera esta propiedad - como se ha dicho - por calentamiento. Durante este tratamiento, el cobre de la aleación situado en la superficie, se oxida con el oxígeno del aire formando un óxido de cobre en escamas; la plata se oxida con menos facilidad y el oro, nada. El resultado, después de sucesivos batidos, recalentamientos y desescamados, es una lámina de la aleación en la que se ha formado en su superficie una capa rica en oro, o en plata o en ambos.

La más importante de las aleaciones utilizadas fue la *tumbaga*, una aleación de Cu y Au metales que se disuelven recíprocamente en cualquier proporción formando lo que se conoce como soluciones sólidas. Por eso la composición de estas aleaciones es muy variada, llegando a tener tan solo un 12% de Au. Su color depende, naturalmente, de la concentración. Las tumbagas altas en cobre son de color rojo o rosado, las ricas en oro son amarillentas.

Separar el oro y la plata que se encuentran asociados en las partículas metálicas de los placeres y también en algunas *tumbagas*, sin utilizar ácidos hoy bien conocidos sería un buen ejercicio para suspender a muchos químicos universitarios. Puede hacerse tratando la aleación con una pasta acuosa compuesta de sulfato férrico y sal.

Como ejemplo de la calidad alcanzada por los artesanos andinos, se puede citar una máscara que se expone en el Metropolitan Arts Museum de Nueva York. Tiene un tamaño de 74 x 40 cm y está repujada en una lámina de *tumbaga*; a pesar de su impresionante acabado superficial en oro, sólo contiene de este elemento un 40%, el resto es Ag (48%) y Cu (12%). Y existen objetos también con apariencia de ser de oro macizo que sólo tienen un 12%, el resto es fundamentalmente Cu.

Gracias a que el Massachusetts Institute of Technology (MIT), se anticipó muchos años a la celebración del V Centenario, se ha podido descifrar este increíble arte del dorado desarrollado por las culturas andinas. La pertinente investigación se realizó en su Laboratorio para Materiales Arqueológicos por Lechtman y sus colaboradores.

Las *artes* expuestas son precursoras de las nuevas tecnologías del acabado superficial y del empleo de bimetales o materiales *cladding*.

LA GRANULACION

Voy a traer también a este discurso uno de los ejemplos más extraordinarios de las *artes* a las que me vengo refiriendo. Para que Vds. puedan explicarse la elección de este ejemplo y dar el valor que corresponda a la calificación de extraordinario, les diré que soy un impenitente Aprendiz de Soldadura, aunque Adelantado, (título profesional que obtuve hace ya cincuenta años). Como aprendiz, pues, quiero que ello sea un homenaje a aquellos anónimos maestros del *arte* que hace cuatro mil años fueron capaces de desarrollar un procedimiento de soldadura verdaderamente asombroso.

La historia, resumida, es la siguiente:

Los metalurgos de la más remota historia se ocuparon, como hemos dicho en obtener y utilizar casi exclusivamente oro, plata, cobre y bronce. Una de sus ocupaciones más desarrolladas fue la joyería. Para los que las valoramos, aunque no las poseamos, el auténtico e indiscutible valor de una joya está en la singularidad de su concepción y ejecución, situadas en su momento histórico.

Con el nombre de *granulación* se conoce una técnica dentro del *arte* de la joyería en la cual el orífice o el platero utiliza pequeños granos de metal para trazar sobre una superficie metálica un diseño ornamental o figurativo. Los granos quedan, digamos por el momento, unidos al sustrato.

Los materiales utilizados con más frecuencia en las más antiguas obras de este arte fueron aleaciones de oro y los ejemplares más antiguos se encontraron en Ur y están datados en 2500 años a. de C. El diámetro de los gránulos en los objetos hallados en las tumbas Reales de Ur es de 2 mm, el de los encontrados en Troya (2350-2100 a. de C.) oscila entre 0.4 y 1.1 mm. y el de los gránulos utilizados en el periodo de la Grecia clásica (510-330 a.de C.) y en la primera fase de la cultura Etrusca (700-475 a.de C.) es, aproximadamente, de 0,25 mm. Los gránulos más pequeños medidos en la granulación Etrusca por "polvo" tienen 0,14 mm. de diámetro, y los más grandes, utilizados en los objetos de Awaria (Hungría, siglo IX), miden ya varios milímetros. Fueron varias las civilizaciones que compusieron sus diseños combinando gránulos de diferentes tamaños. El número de gránulos utilizados en cada pieza es muy variado. Por ejemplo, en un collar griego de Kameiros (siglo VII a.de C.) se han contado - siempre números aproximados, naturalmente - 2.600 gránulos; en un pendiente de Enkomi (Chipre) (siglo XIV a.de C.), 4.200; en cada brazalete de una pareja etrusca procedente de Tarquinia (siglo VII a.de C.) 20.000. El mayor número, 137.000, decora una escudilla etrusca de oro (Praeneste, siglo VII a.de C.) de 10 cm de diámetro; el desarrollo lineal de la decoración mediría 215 m; esta escudilla constituye el ejemplo conocido más representativo y extraordinario del arte de la *granulación*.

Los gránulos pueden estar dispuestos por separado o en línea; en superficie o en masa, con o sin sustrato.

Antes de plantearnos el problema de la unión de estos gránulos entre sí o al sustrato, conviene descifrar el de su misma obtención, con forma esférica y de múltiples tamaños a voluntad. He aquí lo que hoy sería, sin duda, un problema para actuales físicos universitarios, y que fue sabiamente resuelto hace más de cuatro mil años.

La primera referencia a la forma esférica adoptada de forma espontánea y visible por un líquido, habría que situarla, muy atrás en el tiempo, acaso en una gota de agua formada en el extremo de una hoja, o - ¿por qué no? - en una lágrima. Esféricas podrían haber sido las primeras partículas metálicas encontradas dispersas en una escoria o salpicadas al derramar un metal fundido. Era posible, pues, la forma partiendo de un estado líquido; pero había que encontrar el *cómo*, sin saber el *por qué*, cuando interesó la esfera como elemento de decoración. A encontrar ese cómo

hacer pequeñas esferas de oro, o de una de sus aleaciones, se entregó quien se entregara y lo resolvió así: provocando la fusión de pequeñas partículas del metal en un medio que permitiera que la pequeña masa de líquido formada satisficiera su espontánea tendencia a adoptar la forma esférica (el uso de la lima de acero a partir del siglo VII a. de C. proporcionaría las partículas más pequeñas). La fusión la consiguió colocando en un crisol pedazos de metal del tamaño conveniente sobre un lecho de carbón vegetal en sucesivas capas alternativas. Calentando el conjunto a la temperatura necesaria cada partícula fundió, tomó, fundida, la forma esférica perfecta por su poca masa y porque, cuando estuvo fundida no "mojó" al carbón. Ahora lo explicamos muy brevemente: es un fenómeno debido a la tensión superficial, decimos; pero eso es ahora. Sería interesante saber cuánto tardaría algún graduado universitario en ciencias - en el supuesto de que tuviera claro el concepto de tensión superficial - en resolver el problema: obtener miles y miles de gránulos de oro todos ellos perfectamente esféricos, prácticamente iguales, y en una gran variedad de tamaños, a partir de unas cuantas pepitas. Y en el supuesto también de que sus preocupaciones metafísicas le dieran tiempo y ganas de ensuciarse las manos jugando con fuego y carbón.

Ya tenemos las esferas del material y tamaño deseados. Ahora habría que unir las firmemente entre sí o al sustrato y en el sitio que según el diseño ornamental tuvieran asignado, y sin emplear ninguna suelda (aleación de punto de fusión más bajo que los materiales a unir) ni fundente ya que éste es otro procedimiento.

Un estudio bibliográfico revela que los procedimientos de unión en los que se utilizaron productos "adhesivos" no metálicos y que condujeron a la unión de los gránulos se han practicado sin interrupción durante miles de años.

Entre los recientes intentos de reproducir el antiguo proceso de la *granulación* estuvieron el que pretendía sacar partido al intervalo de fusión de las aleaciones y el que utilizaba la aleación con un no metal o quasi-metal. Sin embargo, el control preciso de la temperatura que se necesita en el primer caso - prácticamente imposible de conseguir en un fuego de carbón - y el hecho de que los elementos de presión del punto de fusión necesarios para el segundo (fósforo, silicio, bismuto) no se conocían en aquellos tiempos, determinaron que estos intentos fracasaran. Además, ninguno de estos métodos hubieran sido adecuados para unir gránulos a hilos o a sustratos intrincados debido a que en ellos la temperatura, cuando se calentaran, no sería homogénea.

También se intentó reproducir la *granulación* por sinterizado, contando con la mayor energía por unidad de superficie en los cuerpos esféricos pequeños, unido al elevado coeficiente de autodifusión del oro. Aunque, en principio, el procedimiento podría ser aplicable a aleaciones de oro de muchos quilates - que no fueron precisamente las que se utilizaron en la antigüedad - sería inaplicable en las históricas aleaciones de oro ricas en plata o en cobre, o en ambos. Otra dificultad a añadir habría sido conseguir un calentamiento uniforme de los sustratos (láminas, conformados, huecos, hilos) y los gránulos, o cuando se quisieran unir hilos y gránulos en la misma pieza.

La única técnica probada que se pudo utilizar en la *granulación* por no dejar traza de suelda, es la que empleó productos adhesivos que contenían compues-

tos de cobre. Diez de estos compuestos se encuentran citados en la bibliografía; el más antiguo es la *malaquita*, un mineral que contiene carbonato básico de cobre ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), que se corresponde con la *crisocola* que menciona por primera vez Theophrasto (300 años a.de C.). También se cita la *azurita* ($2 \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). La mezcla de óxidos de cobre ($\text{CuO} + \text{Cu}_2\text{O}$) que se produce cuando el cobre se quema durante su conformado por forja, se mencionaba ya en el siglo XVII a. de C.; y el *verdigris*, obtenido por reacción de vinagre y cobre (básicamente $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{-COO})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), se utilizó en Egipto como sustituto de la *crisocola*, más cara y escasa. A estas citas se une la evidencia de que los objetos de diferentes periodos observados detenidamente presentaban pequeñas manchas de color cobre en la zona próxima a la unión del gránulo y el sustrato, y se ha encontrado también cobre en el mismo contacto.

Una vez obtenidos los gránulos y preparado el sustrato, hubo que colocar cada grano en su sitio para después unirlos entre sí o al sustrato. El uso de adhesivos orgánicos para fijar pequeñas partes metálicas en ciertos objetos lo describió Tehopilus en 1122 (*De Diversis Artibus*) y posteriormente Cellini en 1568 (*One Trattati: Uno Nitorno alle Otto Principali Arti dell Oreficeria ...*) empleando engrudo y goma de tragacanto. También se encuentran citados entre estos adhesivos la cola de curtidor, la goma arábica y la cola de pescado.

Para la *granulación*, con estas colas o gomas y sales u óxidos de cobre se hacía una pasta que, de momento, ya servía para fijar los gránulos al sustrato. Una vez fijados se calentaba el objeto; a 100°C , aproximadamente, las sales de cobre citadas se descomponen dando lugar a óxido de cobre (CuO); a 600°C se produce la carbonización del adhesivo orgánico; a 850°C el óxido de cobre se reduce a cobre metálico; éste cobre reducido, elemental, en contacto con el oro se alea con él formando, local y superficialmente, una aleación de punto de fusión más bajo que el del metal sustrato y de la esfera y en el punto de contacto entre ambos, precisamente en el punto de contacto, se produce la unión por la suelta líquida formada en cantidad mínima pero suficiente para asegurar la soldadura. Si se prolonga el calentamiento y se repite, el cobre depositado difunde hasta llegar a distribuirse por la masa del sustrato y de la esfera sin dejar residuo superficial alguno y sin afectar a la calidad de la unión.

Este complejo y asombroso arte tan primorosamente ejecutado pudo estar interrumpido durante siglos, o al menos utilizado en grado menor. Reproducirlo no debió de ser fácil como lo prueba que a H.A.P. Littledale se le concedió en 1933 una patente (B.P. N° 415181) por el procedimiento que venía siendo utilizado desde hacía cuatro mil años!

LAS FUENTES

Desde el desmoronamiento del Imperio Romano hasta el siglo XVI no hubo relación entre quienes escribían y los que cultivaban las *artes* de los metales. Aquellos se ocupaban exclusivamente de lo trascendente para el espíritu. Por eso los conocimientos metalúrgicos acumulados - muchas veces desvirtuados - se transmitían de viva voz de los iletrados maestros de las *artes* (joyeros, herreros, campañeros, etc. ...) a sus hijos-aprendices. Eventualmente pudo aparecer el clérigo metalurgo letrado, como el monje Theophilus (1100) que escribió su tratado *Schedula*

diversarum artium en el que describía el conformado de los metales por moldeo y por hechurado. Es el texto más antiguo conocido, en él se describen las *artes* o maneras de los hombres que se quemaban sus manos y sus barbas en operaciones metalúrgicas. Theophilus escribió para el operario y no profundizó en la interpretación de los procesos como lo harían ya los autores del siglo XVI.

Alguna información sobre las operaciones metalúrgicas nos ha llegado a través de su representación en vidrieras, grabados y tallas. Por ejemplo, en la archivolta de la portada de la iglesia de Santiago de Carrión de los Condes (antiguo hospital de Peregrinos, siglo XI) están representados todos los oficios medievales, y entre ellos los de herrero y platero. Pero el *arte*, el cómo, estaba amparado en una serie de secretos que quedaron más o menos desvelados en algunos libros como el *Secreti* de Alessio Piemontese (1555).

Los alquimistas medievales se esforzaron en investigar las reacciones que afectaban a los metales, pero sus trabajos no tuvieron valor para el metalurgo. Por el contrario hay quien opina que la alquimia pudo haberse desarrollado a partir del arte de colorear los metales por tratamientos superficiales, *arte* que fue utilizado por los artesanos griegos. Como es sabido Aristóteles se ocupó de las *cualidades* de la materia que asignó a sus elementos (tierra, agua, aire, fuego <> sólido, líquido, gas, energía) y aunque la interpretación de las propiedades finales por combinación de esas cualidades estuviera aún muy lejos de una explicación racional de las diversas sustancias, con ella podía discurrirse sobre las transformaciones superficiales observadas. Al terminar el primer milenio de la era cristiana, la alquimia se hizo *arte oculto*, y por ello los escritos de los alquimistas contienen poca información inteligible que pudiera haber servido para una provechosa especulación teórica sobre los metales.

Esta era la situación cuando Vannoccio Biringuccio escribe su libro *De la Pirotechnia* (1540). Biringuccio personificaba al hombre práctico que trabajaba con los metales para su provecho y para que pudieran utilizarse. Encontraba más satisfacción intelectual en lograr el resultado que deseaba, que discuriendo sobre las causas de los hechos. Su actitud era experimental y se ocupó en operaciones que se sabía daban resultado sin preocuparle demasiado por qué. Recomendaba intentar muchas maneras, hacer las cosas una y otra vez variando el procedimiento, para adoptar la mejor.

Los verdaderos científicos de la época fueron los artífices, y no es que les faltara el resplandor del genio, sencillamente no era el momento para ofrecer una estructura teórica consistente; los genios actuales - que también los hay - no hubieran podido alcanzar a ofrecer esa estructura si no hubieran dispuesto de *hechos*. En aquella época el desarrollo de la química relacionada con los metales fue lento, eran pocas las manos y las cabezas puestas en el empeño y difícil su intercomunicación (estaban aún muy lejos los multitudinarios congresos actuales); unido a todo ello habría cierta resistencia a compartir conocimientos.

Cuando aparecieron los primeros libros sobre las artes metalúrgicas hacía sólo cien años que se había inventado la imprenta y cincuenta que se había descubierto América. De las 30.000 obras impresas en el siglo XV ninguna lo fue sobre aquellas

artes y muy pocas de ciencia. Sin embargo la obra de Biringuccio fue estimulante y al poco tiempo salieron otras sobre *artes* prácticas que iban siendo impregnadas de experimentación; andando el tiempo la Ciencia interesaría al hombre educado.

El siglo XVII fue muy activo en física y química pero no hubo relación entre esta actividad y el rápido aumento de la metalúrgica; sus métodos no cambiaron mucho, la demanda de información escrita estuvo satisfecha con las nuevas ediciones de los autores del siglo XVI (Biringuccio, Agrícola y Ecker). Por esto es también especialmente notable la obra de Don Alvaro Alonso Barba (1640), que luego comentaremos.

Ahora que todo es *nuevo* y *super* - son nuevos los materiales, las tecnologías, los planes de estudio; son super las aleaciones, los conductores, las cuerdas - acaso sea conveniente llamar la atención sobre algunas artes relacionadas con el proletario hierro.

LAS ARTES DEL HIERRO

A las *artes* del hierro no se pudo llegar desde las de fabricación del cobre y el bronce porque en ellas intervienen hechos y técnicas diferentes. Aunque, ocasionalmente, durante la fusión de menas de cobre - en cuya operación se hubiera añadido mineral de hierro como fundente - se obtuviera una pella de hierro, los procesos complejos de carburación, recocido, temple y revenido y, en general de los que condujeron al desarrollo del acero, no pudieron deducirse de la metalurgia del bronce. Eran otra cosa; la transferencia de experiencia sólo pudo afectar a aspectos generales o marginales.

En los siglos XII y XI a.de C. concurren circunstancias políticas y económicas que promovieron e incentivaron la metalurgia del hierro. El colapso de la civilización Micénica y la inquietud generalizada en el mundo Mediterráneo, afectaron al comercio del cobre desde países lejanos y, por ende; se produjo una escasez de bronce. Hasta entonces el hierro casual, subproducto de la metalurgia del bronce, había sido utilizado desde hacía siglos en pequeños objetos y las menas con él asociadas las había por doquier.

Las *artes* de la obtención y elaboración del hierro hubieron de desarrollarse por metalurgos jugando con tierra densa y rojiza, fuego, aire y agua, y con mucho tiempo por delante ya que el efecto sobre el hierro reducido de la incorporación de carbono en ciertas y proporciones, necesita también de tiempo y, además, no se entendió hasta hace apenas doscientos años. Solo la experiencia directa adquirida en la fabricación de útiles pudo conducir a obtener acero y extender el uso del hierro carburado.

Los operarios del hierro debieron de ser siempre hombres singulares; una extraña conjunción de rudeza y sabiduría que hizo del oficio un rito. Un personaje protegido, entre admirado y temido dentro de su pueblo. Casta segregada y endogámica, ceremoniosa y ungida, que oficiaba desnuda, purificada por la abstinencia y por el propio fuego del arte ¿no residía en él el dios que le daba el poder?. El poder del fuego, la mística de su oficio y la habilidad con sus personales herramientas, de las que sólo se desprendía al morir, configuraban a este peculiar individuo.

**DON
ALBARO**

Hablando de antiguas *artes* referidas a metales, e invitados como estamos siendo a recordar con especial devoción la hazaña del Descubrimiento y subsiguientes episodios, quiero recordar una vez más - para que sea una vez menos olvidado - a Don Albaro Alonso Barba. Y aprovecho este discurso para pedir a quienes hoy remueven cimientos o arenales en Sevilla que lo hagan con cuidado, por si salieran a la luz los restos de un cuerpo menudo y amalgamado, vestido de sacerdote, disfrazado de minero en posición suplicante; mirando tangente al oceano, hacia los Andes bolivianos ... Era un español del Imperio a quien le corresponde - desde luego más que a ningún viviente - los honores del Descubrimiento, porque allí estuvo ¡y de qué manera!.

En lo sucesivo cuando me refiera a él lo haré como Don Albaro; me parece que así rindo mejor el homenaje que merece su venerable figura. Citándole como Alonso Barba se podría confundir con alguno de los miles de autores núbiles que firman por medias docenas y a porfía trabajos de fin de semana. Don Albaro fue distinto: murió sin jubilarse, a los noventa y tres años, después de pasarse setenta descubriendo donde siempre se descubren cosas, en el tajo. Y el tajo de aquel momento era el continente americano. Más concretamente, para él, el Altiplano Andino.

Pues bien, don Albaro publicó, en 1640 como Vds. saben, su libro *Arte de los Metales*, por ello, también, no podía faltar una referencia a él en este discurso. Escribió Don Albaro su libro a repetidas instancias de Don Juan de Lizarazu, Presidente de la Real Audiencia de la Plata, quien le recargaba con el servicio del Rey y bien común de todos sus vasallos, "para que sacase a la luz un libro en que se enseñase científicamente lo que en el beneficio de los metales se practicaba hoy acaso sin ninguna regla cierta".

Don Albaro, como es natural, dedicó a Don Juan su libro, y en la dedicatoria le decía que la cosa entre las temporales de más importancia en aquellas tan ricas como dilatadas Provincias, era el trato de las minas y beneficio de los metales, "particularmente de los de plata por azogue; modo de sacársela ignorado antiguamente y no sabido hasta hoy con fundamento" - le decía - aunque desde el año 1574 se usaba en la Villa imperial de Potosí. Aludía a las innumerables pérdidas que aquella ignorancia había causado que, según él, igualaban, sin duda, y aún excedían, a los tesoros que de aquellas Indias se habían llevado y repartido por todas las regiones del mundo. No dudaba de que sus advertencias serían de provecho y por lo menos siendo el primero que escribía de materia tan importante, además del ejemplo que daba para que animasen otros que alcanzasen más, ponía cimientos sobre que se levantasen más aventajados discursos. Don Albaro se sentía en Potosí, no solo como en plaza de armas sino en la Universidad más famosa del mundo, donde más se necesitaba de la conferencia de materias semejantes.

Los Diputados de la Villa de Potosí por el Gremio de los Azogueros, reconocieron en el modo de discurrir en aquellas materias los muchos años de atenta experiencia que don Albaro tenía en ellas, y los daños que habían experimentado en las pérdidas de azogue y en no haber sacado toda la ley de los metales. Vieron las causas y los remedios, señalados ambos con tan concluyentes razones que aunque muchos particulares no los habían podido experimentar, no dudaban de su certidumbre.

Libro tras libro Don Albaro nos habla de los olores y sabores de las tierras y sus causas; de la generación de los metales; de su número y lugar en que se crían; de sus causas eficiente y formal; de que el beneficio de los metales no le use sino quien entienda y con licencia y exámen de la justicia; de cómo se conocerán y quitarán las malezas que tienen los metales; de la simpatía y antipatía que hay entre ellos; de la liga; de la manera de apartarlos; de cómo se han de beneficiar por conocimiento; de las cosas que ayudan a su fundición; de los hornos, de los instrumentos ... He aquí algún ejemplo de sus *artes*.

Hablando de los inconvenientes del beneficio por cocimiento se refiere a la facilidad con que el azogue rompía los fondos, "con riesgo de perderlo todo" como le había sucedido a cierto dueño de ingenio que quiso, sin más conocimiento, hacer la operación como la hacía Don Albaro. "Mucho tiempo pueden durar los fondos si se hacen como deben - dice Don Albaro - y asegura que a él le sirvió cinco años contínuos un perolillo bien delgado. Ocurría que el dueño del ingenio era fundidor de campanas y fundió sus fondos como fundiera campanas, con su ordinaria liga de estaño. "Gruesos errores ambos - advierte Don Albaro - de quien sólo tenía noticia del arte al vuelo"; de esos errores había de seguirse necesariamente su perdición, pues la humedad del agua y del azogue no pudieron defender de la violencia del fuego "la parte del fondo que, por su grosedad, estaba de ella tan distante, y así fue la fuerza de derretirse, y por la parte que el azogue lo tocaba también lo había de penetrar y pasar fácilmente por la mezcla del estaño". Magnífico.

Sigue después la interpretación correctísima del poco durar las calderas o peroles ordinarios con el azogue, debido a tener algunas soldaduras o por haberse bañado de cobre no macizo, sino esponjado, "del que se causan sutilísimas hojas que con facilidad se traspasan".

El mayor daño que los fondos recibían era en la circunferencia que marcaba la superficie del azogue causada por el batir contínuo de los hervores "y la junta del metal y el agua". El remedio que propone es a la vez ingenioso y pícaro: poner un cerco de cobre del canto de un real de a ocho o poco más grueso, y de tres o cuatro dedos de alto ajustado a las paredes. Los golpes los recibía aquel cerco que cuando con el tiempo se gastaban, se ponía otro a poca costa, "habiendo pasado por plata todo el cobre que de él se hubiera consumido". Un pecadillo perdonado, señor cura, por haberlo confesado.

Aunque en su *Arte* enseña "el modo de fundirlos todos", al hablar del hierro y del modo de fundir su mineral confiesa que él no ha practicado "por mayor" su fundición ni quiere tratar de ella "por no escribir cosa que muchas veces no haya experimentado". Por eso sólo pone en su libro el modo con el que estaba informado de personas prácticas.

Del hierro dice que es, si no el más precioso, sí el más necesario de todos los metales, para los usos humanos, aunque pudiera dudarse si son iguales o exceden en el mundo sus daños a sus provechos. "Hízole la naturaleza durísimo por el exceso de la parte terrea, o azufre fijo, de que lo compuso, aunque con la porción bastante

de humedad o azogue; por lo primero no se derrite al fuego si no es con mucha violencia, por lo segundo no se quiebra o desmenuza con el golpe del martillo, como las piedras duras; antes se extiende y se dilata. Es metal frío y seco, más poroso que los demás y así pesa menos que ellos. De aquí es el criar orín y corromperse fácilmente en la humedad y más si es de agua salada. Gástase también al fuego, cada vez que se le caldea, convirtiéndose en escoria, por ser tan terrestre y faltarle la humedad. Si encendido se apaga en agua fría queda muy quebradizo porque el calor se recoge y une en el centro de su cuerpo huyendo de la frialdad de su contrario.

La resistencia que hace el metal de hierro al fuego sobre todos los demás metales, obliga a los que se ocupan de este ministerio a usar de más violencia y fuerza para rendirlo y sujetarlo de suerte que quedase apto para que se acomodase a los usos humanos.

Para fundirlo, dice Don Albaro, las corpas o pedazos grandes de mineral se quiebran y hacen menores, del tamaño de nueces o manzanas para que el fuego las traspase y queme más fácilmente. Hacíase un hoyo, acomodábase en él leña y carbón, y encima se le mezclaba y amontonaba el mineral de hierro. Dábasele fuego; sacábase después de frío y a medio fundir que parecía escoria. Preparado de esta suerte se le echaba en un horno alto, llenábase su catino de carbón, sobre éste se ponía mineral, luego carbón y más metal encima. Dábasele fuego muy recio con barquines grandes. El mineral se ablandaba como una masa y se juntaba en una gran torta. Sacábanse las escorias por la boca que para ello tenía el horno. Acabada la fundición y frío el hierro, se sacaba afuera, se le sacudía la escoria que llevara, se cortaba con tajaderas en pedazos que, vueltos a caldear, se extendían u acomodaban con un gran martillo en bergajones o planchas.

EL ARTE Y LOS SECRETOS

La calidad de la obra dependía de cómo se manejara el fuego y de la habilidad del herrero para dar forma al hierro por golpe y no con lima. Si la pieza había de hacerse en hierro y acero, se operaría de manera que ambos quedasen bien unidos, esta unión - por cierto un anticipo genial de lo que en las nuevas tecnologías se conoce como soldadura en fase sólida - fue fundamental, y sigue siéndolo, para la fabricación de herramientas, con objeto de repartir debidamente la función de cada material en el servicio.

Para quienes se mostraban proficientes se les reservaba el nombre de *maestros*, a éstos ni se les quemaría la masa cuando trataran de llevarla a "ebullición", ni por temor a que ésto les sucediera se quedarían por debajo del "punto" conveniente. Dada la naturaleza del *arte*, la amplia aplicación de sus productos, el momento y las circunstancias, es natural que la cualificación del *maestro* la diera la experiencia, que también desarrolla la habilidad.

Pero las *artes* tenían sus secretos y las de la elaboración del complejo hierro eran particularmente cabalísticas. La expresión más elocuente de aquel secretar en el oficio es la invitación que no hace muchos años aún hacía un herrero rural a sus parroquianos de la fragua: "salíos que voy a templar", les decía.

Muchos de aquellos secretos lo siguen siendo hoy para quienes manejan el fuego, la tierra, el aire, el agua ... y el hierro.

El verano pasado daba quien les habla un curso de forja para maestros del oficio; trataba de darles mi interpretación de su *arte* a la luz de otros saberes que los suyos. Habíamos salido al encuentro recíproco desde dos perspectivas distintas del mismo mundo: el del hierro. El encuentro se produjo en terreno de todos y ninguno: en un antiguo monasterio, el de Santa María la Real de Aguilar de Campoo. Buen lugar para la reflexión: aire limpio, agua de berros, piedra de grano, fuego de sol, y de fé para quien quisiera. Nos enseñamos muchas cosas. Parece mentira que alrededor de una fragua nos encontrásemos tan próximos y tan distantes, y a la vez tan identificados. El Sr. Vicente - un forjador de 83 años - que hubiera muy bien cumplido los quinientos por lo que hizo y cómo - cuando arrojaba arena de miga sobre el hierro candente lo hacía "para meterle calor"; cuando con una escobilla mojaba el carbón ardiendo, lo hacía "para sujetar el calor"; cuando introducía en agua la pieza al rojo algo de aquélla "se metía" en el hierro y le endurecía; cuando soldaba, "pegaba". Metía, sacaba, golpeaba y refunfuñaba echando de menos más viento, mejor carbón, otros hierros, y otros tiempos; pero acabó dominando a la materia, forjando un hermoso candelabro, y "pegando" acero y hierro.

Con cuántas explicaciones y con cuántas ganas quería enseñarnos lo que él sabía hacer, sin duda mejor que yo, aunque no supiera por qué. Se repetía la memorable lección de humanidad, intuición y destreza que otro herrero, Jesús Juez, diera en nuestra Facultad hace pocos años. El Sr. Vicente, Jesús, Ernesto y Manolo el herrero de Compludo están en su derecho de no profundizar en por qué el hierro para hacerse acero necesita que el carbono se le "meta" desde las brasas. Ellos se ocupan en hacer, por *arte*, útiles. Para ellos no ha llegado, o se les ha pasado, el momento de entender la alotropía del elemento hierro o el diagrama de equilibrio del sistema hierro-carbono; o cómo se interpretan la plasticidad y la fragilidad de los metales. Pero les gusta que alguien que entienda se lo cuente para eso, para quedarse con el cuento.

Probablemente el mayor celo lo pone cada uno en guardar sus secretos personales del "pegado" por forja y del temple. En la soldadura, por ejemplo, el secreto se enredaba en el vigor del fuego hasta que la pieza chispeaba y en la arena de miga arrojada con precisión en tiempo y forma. En el temple el secreto se ocultaba entre jugos, aceites, aguas y colores que el hierro "expulsa" al enfriar con la ayuda de cuerno de carnero. Las *artes* de la soldadura por forja y del temple interrumpido siguen siendo secretas allí donde es mejor que así lo sean para que el herrero de Arbejal o el de Saldaña, o el de Compludo sigan siendo admirados y proclamados en la olimpiada del trabajo, mejores que ninguno. Al mismo tiempo, en otras fraguas, se desarrollan con base científica la soldadura por difusión en estado sólido y los tratamientos isotérmicos y termomecánicos, para lograr la combinación óptima de dureza y tenacidad aunque el operario sea un ordenador y el resultado una quimera.

Arte secreto era el revenido de las limas que se hacía con una mezcla de negro de humo de cuerno o cascos de buey, vidrio molido y sal común, todo ello

humedecido con vinagre, orina o agua fría. Cabe pensar que, aproximadamente, ésta era la operación que no hace mucho tiempo hacían unos “hungaros” de carreta en los arrabales de los pueblos. Hoy lo llamamos cementación por carbón activo, y se puede interpretar lo que cada componente de la mezcla hace, cuando no sobra.

LAS ORDENANZAS

La nobleza, la importancia, y el valor de las artes de la metalurgia del hierro se reconocieron en las Ordenanzas de Oficios. Para dictar la del Oficio de Cerrajeros de la muy leal ciudad de Burgos, Cabeza de Castilla, fechada el 4 de diciembre de 1567, júntese Corregidor, Procurador y Regidores quienes entendían “en las cosas que son e convienen al servicio de Dios Nuestro Señor y de su Majestad y al bien común”, particularmente en lo tocante al Oficio de los Cerrajeros para que bien y fielmente y sin fraude ni daño de la república usen y ejerzan el dicho Oficio. Quedó mandado que las Ordenanzas habrían de guardarse y cumplirse sin ceder en cosa alguna por todos los oficiales de la ciudad, de su tierra y de su jurisdicción.

Para empezar, se mandaba que no hicieran juntas ni ayuntamientos contra lo proveído y mandado por la Ley (sabio mandato). Y seguían ordenando y mandando que ninguna persona ni oficial del dicho Oficio, pudiera poner ni pusiera tienda sin ser primero examinado; que cualquiera persona que hubiere de ser examinado supiera bien hacer unas cuantas cosas: picar todo género de limas, bien hacer una cerraja de dentro y de fuera, otra cerraja para un arca por de dentro y por de fuera “muy bien hecha y con primor e a todo provecho”, y saber hacer un candado igual de bien y que tenga algún secreto.

El exámen podía realizarse en la casa de un veedor pero en este caso el examinando había de llevar a su costa carbón, hierro y materiales, herramientas y tornillo y, si fuera necesario, mozo que le ayudase. Lo que le mandaren había de hacerlo “cerrado en la cámara, sin mostrallo a nadie y que todas las dichas obras las haga a la vista, satisfacción y contento de tales veedores”. Estando bien hechas y siendo por ellos aprobadas, los tales veedores, le daban licencia y carta de exámen para poner tienda y usar el dicho Oficio.

Ya en ejercicio, como en el arte y oficio de la cerrajería hay obras más sutiles y no tan comunes, mandaban que ningún oficial tome a hacer ninguna obra para la que no haya sido examinado o tenga entera licencia y pericia.

En defensa del consumidor - como ahora se diría - se ordenaba y mandaba que las cerrajas y las llaves que se hicieran fuesen conformes en todo (ya se entiende). Y cómo algunas personas del oficio compraban cerrajas y llaves viejas y las remendaban, estañaban o limaban o las hacían cualquier otro beneficio, vendiéndolas por buenas “lo cual es un gran fraude y engaño de la república”, mandaban que no se atrevieran a hacerlo a no ser que las vendieran por viejas y cada cosa por lo que es, so pena de unos cientos de maravedies.

Los veedores no se libraban del rigor de lo ordenado y eran obligados a que, con toda diligencia, visitasen las tiendas del oficio un día o dos en el mes o cuando ellos quisieran o menester fuese. Por su parte el visitado había de mostrarles todo:

tienda, casa, labores y ser “muy bien comedido e por las dichas visitas ninguna palabra descomedida les diga, ni se les haga ningún otro género de descortesía ni descomedimiento”.

Esta manera de entender los Oficios en el arte del hierro formaba parte del mundo que se descubrió a los pueblos del continente americano. También allí se ordenó y se mandó hacer bien las cosas. La metalurgia había evolucionado de forma distinta en diferentes partes del mundo, por eso su estudio hay que regionalizarle. Precisamente el ejemplo más elocuente de que ésto fue así lo tenemos en el hecho de que en el momento del Descubrimiento las civilizaciones precolombinas no conocían el hierro y poco el bronce. Era, pues, momento de mandar y ordenar también en las *artes* de la metalurgia.

Así, un año después de promulgarse la Ordenanza de Burgos para los Cerrajeros, la muy noble y leal Ciudad de México daba el seis de abril de 1568 sus Ordenanzas de Herreros. Según ellas los oficiales no podrían poner tienda sin ser examinados por dos veedores, y sólo podrían usar de lo que fuesen examinados. Se examinaban de un mazo, un guijo, un pico, una reja de arar, un azadón, un calabozo, un hacha, un martillo de orejas - o de lo que supiese - “usando sólo de lo que debe y sabe”. Todas esas cosas debían estar bien calzadas, con acero bien templado, ni muy blando ni tan fuerte que se quebrase; y bien fornidas, y los ojos bien soldados, sin engaño ni público ni secreto. No podría venderse por reja nueva la Vizcaina adobada a no ser que se diga; ni comprarse herramienta vieja para adobarla y venderla, pero sí bien adobar y soldar la que un dueño les llevara. Así nacía la acreditada industria mejicana del fierro y del acero.

La prohibición de que nadie que no hubiera sido propiamente examinado hiciera labores del Oficio ordenado, alcanzaba al mismísimo Rey. No tengo noticia de que algún monarca tratara de remendar personalmente su espada, pero sí se tiene de que Fernando el Santo para poder coser por sí mismo el manto de una Virgen, desgarrado por la flecha que iba para él, hubo de ser antes admitido al Gremio de los Maestros Alfayates de Sevilla.

Queden para otra ocasión otras *artes* y otros comentadores. Cualquier otra *arte* sería de igual provecho para que los tecnólogos de hoy, entiendan mejor no solo los tiempos de aquéllas, sino los nuestros. Con ello el lego se vería estimulado a pensar en cómo hacer las cosas - lo que puede ser una actividad tan creadora como la que se reconoce sin discusión, y a veces sin recato, a ciertos artistas de hoy - y a profundizar en las raíces de la civilización tecnológica actual. En palabras de Don Albaro podría decir que demás del ejemplo que he dado para que se animen otros que alcancen más, he puesto cimientos sobre que levanten más aventajados discursos.

El fuego ha sido hasta aquí el gran protagonista de este discurso y no quiero dejarle apagar. Empecé con una referencia de Plinio, seguí con las múltiples de Don Albaro y los herreros, y quiero que siga ardiendo con una última de Biringuccio. El último capítulo de su citado libro se le dedicó este autor “al fuego que se consume sin dejar residuos, que es más poderoso que cualquier otro fuego y que tiene como

operario al gran hijo de Venus". Solo el título haría ya felices a tecnólogos, ecólogos y politólogos.

Cuando reexaminaba su trabajo para ver si había algo que hubiera silenciado, inmediatamente - dice - le vinieron a la memoria los muchos sublimados, destilados y humos que se habían producido al arder el más poderoso fuego del amor. "No necesito decir - escribe - que supe de él en los más alejados países o por conducto de otros hombres, pero también en mi propio pecho, en mí mismo, y por eso puedo con seguridad valorarle como el más caliente de todos los que el mundo llama fuegos".

Ese fuego del amor, señor don Vannoccio, está perdiendo calor, le falta el viento del coraje; sobran humos y falta llama. Ahora solo se pueden templar gaitas.

LAS ARTES EN LOS LABORATORIOS

No hay solución de continuidad entre lo que hasta aquí he venido comentando y lo que a partir de este momento voy a presentarles, pero para que quepa en este discurso hemos de dar un salto en el tiempo y situarnos ya en las *artes* de la ciencia que condujeron a las más sorprendentes y casi impensables nuevas tecnologías.

Antes de empezar quiero hacer una breve reflexión para subrayar que en los acontecimientos más recientes - los que se han producido en los últimos cien años aproximadamente - la historia y su prehistoria se han aproximado: los siglos se han hecho años y los años días. Muchos de los que hoy vivimos - al menos los jubilados - hemos podido conocer en persona, a los artífices de las *artes* de ayer, casi de hoy mismo. En menos de cincuenta años hemos pasado de la radio de galena - terror de las patronas y felicidad de las celosas porteras - al detector cristalino. Pero la ciencia, capaz de inspirar y realizar tantas maravillas, se aleja cada vez más del ciudadano normal que se siente incapaz de entender sus argumentos esotéricos, aunque está bien dispuesto a creérselos porque apoyan realidades que le satisfacen, sin entrar a debatir sobre los efectos de la escalada del avance tecnológico sobre la vida de la gente ordinaria. No falta quien cree que convendría darnos un respiro atemperando el progresismo, limitando el abuso de la tecnología y mejorando la educación fundamental cuya falta deteriora el convivir de cada día. Por lo visto lo que se llama bienestar es compatible con que en un país supertecnificado el 50% de los muchachos de 17 años no sepan calcular el área de un cuadrado, o un 80% sean analfabetos funcionales, y la verdad es que para vivir a trompicones, escribir a trazos y hablar en jerigonza no hace demasiada falta ser educado.

Un observador reflexivo de los tiempos de la Ilustración pensaría que en los casi trescientos años que habían transcurrido desde el Descubrimiento se habían producido cambios radicales en la forma de vivir y pensar. Pero aunque hubiera tenido poderes proféticos no habría podido sino maravillarse de la transformación producida en la vida social y política que iba a seguir a la revolución tecnológica que empezaba a mediados del siglo XVIII.

La brecha hacia el entendimiento científico de los materiales no vino de la revolución científica que se vivió en el siglo XVII incluidas las aportaciones de la física (aunque los corcúspulos cartesianos fueran un importante concepto precientífico),

sino un siglo más tarde con la química analítica y el descubrimiento de nuevos elementos químicos, algo que había permanecido inmutable y recuperable a través de muchas transformaciones y combinaciones vividas como experiencia propia por los metalurgos en las muchas separaciones de fase y particiones en las operaciones de fusión y afino y en los métodos de ensayo que, basados en ello, habían desarrollado.

Ni la teoría económica que daba por sentados los cambios tecnológicos, ni la propia ciencia poniendo énfasis en conceptos cosmogónicos por un lado y en la atómica por otro, dedicaron ninguna atención al desarrollo del conocimiento de las diversas propiedades de los *materiales* que se iban descubriendo y aplicando en laboratorios y en las *artes* industriales. La ciencia parecía más interesada en la *materia* que en los *materiales*. La mayor parte de los aspectos relacionados con el comportamiento de los materiales que interesan a un metalurgista dependen de la microestructura y son demasiado complejos para poder ser tratados matemáticamente por los físicos, tratamiento solo aplicable a sistemas definidos que excluyen cambios estructurales por encima del nivel atómico. La plasticidad, por ejemplo, no fue del interés del físico hasta bien entrado el siglo XX, en tanto que la cinética y otros aspectos de la mecánica de los sólidos que dependen solo de la masa y de un comportamiento perfectamente elástico, fueron objeto de estudio y causa de expansión de la ciencia física desde el siglo XVII. A los historiadores de la ciencia se les ha escapado - y más aún a algunos políticos de la Ciencia - que la rama de la física hoy más floreciente, la del estado sólido, encuentra sus antecedentes, su prehistoria, en la metalografía.

La Física moderna es solo centenaria, pero por primera vez el pensamiento científico abstracto y el *arte* de la investigación cultivados sin preocuparse de las consecuencias para la vida humana, iban a obtener, actuando coordinados, como inesperada consecuencia, la posibilidad de utilizar unos recursos naturales completamente diferentes - en clase y en escala - de cualquier ingenio contemplado en las antiguas técnicas, nacidas de *artes* empíricas remotas.

Aceptando que la Ciencia se interesó más por la *materia* que por los *materiales* trataré de relatar la secuencia de los acontecimientos que en el campo de la estructura de la materia se produjeron en un laboratorio singular: el Cavendish, de Cambridge.

Cambridge está impregnado de Historia y de historias. El arte de investigar tiene allí una referencia excepcional en la escuela del Cavendish, esencialmente un Laboratorio de Física Experimental. Tanto la fundación del Cavendish en Cambridge (1871), como del Clarendon en Oxford (1868), fueron un reconocimiento a las ciencias que ya entonces se llamaron "progresivas" para distinguirlas de las Matemáticas y de la Filosofía Natural que aún dominaban los currícula de los Colleges. Es decir, ambos nacieron no sin fuerte oposición pero con firmeza, con decisión, y con prudencia, sin arrogancias: la dotación inicial del Cavendish fue un Profesor, un Demostrador, un aula, un espacioso laboratorio y unos cuantos aparatos para experimentos convencionales. El VII Duque Devonshire, descendiente de Henry Cavendish, era a la sazón Chancellor de la Universidad y pagó de su bolsillo esta nueva aventura científica. Du-

rante los primeros seis años no hubo más de veinte alumnos trabajando.

Queda para otra ocasión el hacer una historia, aunque sea breve, de aquel prestigioso laboratorio; lo merece y es seguro que interesaría a todos Vds. Digamos sin embargo que allí se cultivaron las que, aunque recientes, son ya antiguas *artes* de las nuevas tecnologías. Porque *artes de hacer* fueron los experimentos que condujeron a J.J. Thonson a descubrir el electron (1897), a E. Rutherford el núcleo de los átomos (1911), a F.W. Aston a la separación de isótopos (1913), a Ch. T.R. Wilson (1911) a su cámara para hacer visible lo invisible ... La época de estos nombres, de estos hombres, fue la del lacre, las latas y las cuerdas - las cuerdas de atar, no las cuerdas y supercuerdas, flojas todavía, de la unidad simple del Universo - y el Cavendish una especie de casa cuna para genios, para que una especie de locos cuerdos divertidos y talentudos, pudieran volar a su antojo, y crear la ciencia del mañana, que es hoy. Y hacerlo con desenfado, gozando el arte de hacer que sabe encontrar en él éxito y en el fracaso ese camino desconocido en el que a cada momento se enciende la luz del conocimiento; con tiempo por delante para poder pararse a gustar una taza de té y hablar de eso, del tiempo.

Aquellas "criaturas" estaban constantemente estimuladas a utilizar sus manos, guiadas por su cabeza, en hacer, en enmendar, en reparar y en mejorar experimentando.

Hablaba hace un momento de historias urdidas a la trama de la Historia de la ciencia y de la tecnología, que marcan el carácter que tuvo aquella aventura. He aquí algunas.

Se cuenta que E. Rutherford acompañaba en una ocasión a un eminente visitante americano por los vericuetos del viejo Cavendish. En un oscuro rincón se adivinaba, más que se veía, una figura humana que estaba haciendo girar los pedales de una bicicleta invertida (ruedas arriba). La cadena transmitía el movimiento a una dínamo. Al pasar por su lado la sombra humana le dijo al Prof.: "Por cierto, Profesor ¿cuándo cree Vd. que podré conseguir el motor que tengo pedido?" Rutherford sin detenerse le contestó complaciente: "Cualquier día de éstos". Cuando se habían alejado unos pasos, le dijo a su visitante: "Usted perdone, debía habersele presentado, era Aston, el premio Nobel".

Kapitza fue uno de los muchos ciudadanos del mundo que Cambridge ha incorporado, asimilado, o ha devuelto a su procedencia con la plusvalía de su experiencia. En el año 1921, Peter Kapitza, hijo de un general del Zar, llegaba a Cambridge donde iba a permanecer catorce años. Llegó a ser una especie de lugarteniente de Rutherford. Era talentudo, divertido y excéntrico. Sus trabajos se sitúan en las antiguas artes de la actualísima superconductividad. Su buen humor tuvo que ver con el cocodrilo grabado en la fachada del Laboratorio Mond, construido en 1933 a expensas de la Royal Society con un legado de Ludwig Mond. Kapitza pagó la grabación del cocodrilo probablemente para darse el gustazo de tirar del cordón de la cortinilla que le ocultaba a la curiosidad del mundo académico, y para explicar su significado: "En

Rusia - dijo - el cocodrilo es el símbolo del padre de familia. Pero este animal se contempla también con respeto y admiración porque tiene un cuello rígido y nunca vuelve su cabeza. Marcha hacia adelante; como la Ciencia, como Rutherford".

Este original y desenfadado homenaje a su maestro, fue una de las últimas bromas de Kapitza. En 1934 volvió a Rusia y allí se quedaron con él. Rutherford solicitó su regreso a Inglaterra pero las autoridades soviéticas, aun comprendiendo el interés del maestro, no le complacieron; también ellos le necesitaban. Pero en el Laboratorio Mond se consiguieron alcanzar los 0.005°K (1937).

Peter Kapitza es en Cambridge un personaje legendario. El neozelandés Ernest Rutherford es Lord Rutherford of Nelson, al decir de los *daffodils* la mayor figura científica después de Newton.

Todos los colaboradores de Rutherford tenían que echar una mano - o las dos - en cualquier momento, técnica u oficio en que fuesen requeridos (alto vacío, soplado de vidrio, montajes eléctricos, etc. ...). John Douglas Cockroft fue uno de los que más aportaron en el momento en que el aparato, la máquina, intervino en el arte de investigar (había sido aprendiz en los talleres de la Metropolitan Vickers). Cada tarde tenía lugar una especie de ceremonia en el laboratorio de Rutherford que consistía en contar las colisiones de las partículas "alfa". Previamente había que acomodarse a la oscuridad lo cual se hacía mientras se tomaba el té a la luz de un mechero de gas situado en un extremo de la estancia, y se escuchaba a Rutherford que hablaba de todo. Entretanto, una pequeña fuente radiactiva proporcionaba las partículas que se propagaban por un tubo lleno de nitrógeno. En el extremo del tubo había una pantalla recubierta con sulfuro de cinc, sustancia en la que se producen destellos luminosos cuando sobre ella chocan partículas atómicas. Todo este dispositivo estaba alojado en un cilindro de latón y los destellos que se producían de forma intermitente habían de observarse a través de un microscopio. Lo que se observaba era el efecto de las partículas producidas por desintegración de los átomos de nitrógeno. Los estudiantes - colaboradores y contertulios de Rutherford se alternaban en turnos de un minuto en mirar por el microscopio y contar los destellos.

Así las cosas, era lógico que Rutherford soñara con disponer de una fuente de radiación que pudiera producir partículas "alfa" a voluntad, no de forma constante e inalterable como la sustancia radiactiva. Quería poder aumentar su número y, a ser posible, su velocidad; disponer de una copiosa fuente de partículas con energías individuales diferentes, más allá de las partículas "alfa" y "beta" de las sustancias radiactivas. Es decir más partículas, más diversas y más veloces.

J.D. Cockroft fue el hombre para el problema, ayudado por E.T.S. Walton. La audaz idea de Cockroft fue producir una descarga eléctrica a través de hidrógeno para obtener una buena cantidad de protones y acelerarlos en un fuerte campo eléctrico; estos "proyectiles" se harían incidir sobre un "blanco" de Li ó B, dos metales ligeros en los que producirían, al chocar con sus núcleos, lo que fue la primera transmutación de unos elementos.

El aparato utilizado para este *arte* fue, inicialmente, ya lo hemos dicho, una pequeña cámara como parte de un artefacto que resultó ser el mayor aparato que, hasta la fecha, se había instalado en el Cavendish y con el que Cockcroft había de poner a prueba su idea. Su coste parecía astronómico para los hambrientos científicos del laboratorio, pero la Royal Society apoyó. El acelerador de partícula presentó - ¡cómo no! - bastantes problemas (de alto vacío, por ejemplo), en su solución quedó claro el valor de la habilidad y experiencia de Cockcroft en hacer con las manos lo que su cabeza le mandaba. Los elementos esenciales del aparato fueron: dos cilindros de vidrio (de los que se utilizaban en las bombas de gasolina) dispuestos uno encima de otro; un transformador; una batería de condensadores; unos rectificadores; lacre, plastilina, latas de galletas; cajas de embalaje .

Con tesón, con calma, sin perder el estilo, se construyeron, ensamblaron y conectaron las distintas partes, y una mañana de abril de 1932, cuando los crocuses se abrían en los Backs, la instalación estuvo *ready*. Lord Rutherford of Nelson daría el visto bueno. Se oscureció el laboratorio, sonaron los interruptores, zumbaron los generadores para la tormenta, latieron las bombas de vacío, chascaron las descargas de la alta tensión entre las esferas, resplandeció en azul el alto tubo de vidrio ... Desde una caja de embalaje a modo de garita, cerrada por una cortina, el observador seguiría, en cuclillas, a través del microscopio las trayectorias luminosas de los pedazos atómicos que cantaban su llegada al contador Geiger. De repente se oyó un tenue ruido seco y un contador empezó a registrar los átomos quebrantados.

Se dice que Rutherford comentó: "Esto les convencerá a Vds. de que el átomo siempre recibirá energía, pero nunca la acumulará". Sería uno de los pocos errores que cometió en su afán de escudriñar los átomos y en sus previsiones y fue obstinado en su idea. No creyó en la energía nuclear como energía potencial de eventual aplicación; pensó, por el contrario, que para romper un átomo habría que utilizar más energía de la que se pudiera obtener.

Terminado el primer experimento del *arte* de romper átomos alguien le preguntaría: "¿Y ahora qué, Profesor? ¿A donde vamos a parar?" ¡Quien lo sabe!

En el museo del Cavendish se exhiben los "juguetes" del *arte*. Produce escalofrío contemplarlos: la cámara de Wilson, el aparato experimental de Rutherford, el espectrógrafo de rayos X de Sir Lawrence Bragg y el de masas de Aston, el "ingenio" con el que James Chadwick descubrió el *neutron* ... (1932).

La del *neutrón* es otra historia para la reflexión. Empezó con las especulaciones de Rutherford (1920) sobre su posible existencia. Había de ser eléctricamente neutra, como una combinación de *proton* y *electron*. Si aquella partícula existiera podría moverse libremente a través de la materia sin ser ni repelida ni atraída por otras partículas. Chadwick empezó a buscarla en 1924.

La interrogante sobre aquella partícula neutra se resolvió después de muchos trabajos en diferentes países (Bothe y Becker en Alemania; Frederic Joliot-

Curie y su esposa, Irene, en Francia). Los resultados obtenidos en Francia se publicaron en enero de 1932: la radiación desprendida del berilio bombardeado con partículas "alfa", al incidir sobre un "blanco" de parafina, desprendía de ésta una especie de protones muy rápidos. Chadwick intuyó que podía tratarse de las partículas neutras que postulara Rutherford hacía doce años. Eran desde luego piezas fundamentales en la composición de la materia.

Chadwick construyó su pequeña cámara y experimentó con éxito: al mes de la publicación de los Joliot-Curie, había identificado la partícula que llamó *neutron*, que encajaba perfectamente en la estructura del núcleo del átomo que Rutherford había diseñado. El descubrimiento del *neutron* conseguido con un pequeño "ingenio" pero con gran atención, inspiración e intención, estaba en la línea marcada por Rutherford desde hacía años y, era la culminación de un trabajo duro, a veces tedioso, de muchos científicos. Al poco tiempo se aclaró el papel que esta partícula jugaba en la estructura del núcleo: el átomo de hidrógeno *ordinario* era el único que no tenía neutrón en su núcleo, pero el hidrógeno *pesado* tenía un neutrón además del protón, etc. ... El uranio (el elemento natural más pesado, Pa 238) tiene 92 protones y 146 neutrones; su isótopo más inestable (Pa 235), tiene tres neutrones menos en su núcleo, y es el combustible de las centrales nucleares.

Esta partícula (neutrón) tenía las características que ya había apuntado Rutherford: se podía mover libremente a través de la materia, y no podía ser retenida en un recipiente estanco. Se trataba del proyectil subatómico ideal porque penetraría a través de las capas electrónicas sin repulsión ni atracción eléctricas. Se puso de moda desintegrar átomos después de que Chadwick construyera un pequeño ciclotron (1939) para bombardear núcleos. La Universidad de California obsequió con otro a su Prof. E.O. Lawrence. Se trataba del antecedente de los actuales aceleradores gigantes en servicio o en construcción en ambos mundos, después de haber resuelto, por impulsos electromagnéticos, la aceleración de las partículas.

Era la Edad de Oro de la Física en el Cavendish. Se estaban sucediendo, en poco tiempo, los descubrimientos iniciados con el del electron (1897) y el núcleo (1911). Un día fue la transmutación de los elementos ligeros, otro día el *neutrón*, otro día el Prof. Blackett visualizó el par *electron-positron*, otro se estableció la naturaleza cristalina de las proteínas, otro, estudiando las capas reflectoras de la atmósfera se desarrollan los principios del radar ...

Los responsables del Cavendish conscientes de la responsabilidad adquirida con su prestigio, siguen sabiendo encontrar el rumbo en cada momento. Por ejemplo, bajo la dirección de Sir Nevill Francis Mott se formó en su momento una floreciente escuela de "física del estado sólido" sobre las ya existentes de cristalografía y bajas temperaturas. La "física del estado sólido" es un nuevo encabezamiento en el mundo sin límites del área de conocimiento denominado de forma imprecisa y cursi, "física de la materia condensada". Esta parte de la Física estudia hechos muy antiguos. Cuando el hombre obtuvo cobre y descubrió que se endurecía cuando tenía "algo más", que fue estaño; cuando descubrió que se agriaba si se le trabajaba en frío y se ablanda-

ba y hacía dúctil cuando se calentaba; cuando templaba y revenía un hierro, estaba iniciándose, aunque empíricamente, en la física del estado sólido. Pero hasta hace cincuenta años no se investigó e interpretó fundadamente la notable propiedad de los metales que conocemos como ductilidad, propiedad que el hombre venía utilizando hacía miles de años. La disposición de los átomos en un metal, la estructura cristalina de estos materiales, la redistribución de sus átomos por efecto del calor o de una tensión externa, el fenómeno de la conductividad, etc. ... son hoy de enorme importancia técnica.

Es curioso que Sir Laurence Bragg, siendo Cavendish Professor, y metido entre redes cristalinas, fuera quien propusiera a Martín Ryle que empezara a investigar en radioastronomía. El primer artefacto de Ryle fue, una vez más, muy simple: unos cuantos metros de hilo sujetos a unos aisladores, algo que parecía ridículo frente al gran telescopio de Monte Palomar. Nacía el arte de penetrar en el fascinante desafío de conocer mejor el universo. No era en sí misma una aventura estrictamente tecnológica. Se trataba de captar y analizar el mensaje celeste de los restos de una estrella supernova que ya había sido observada por astrónomos chinos en 1054.

Las radio-observaciones iban a poder trazar un nuevo mapa de los cielos, hablar en ecuaciones con posibles pobladores de un mundo vacío por lo inmenso. Iones, electrones y protones volvían al interés de los científicos de Cambridge sobre las ondas de la radiación que producía su encuentro en los espacios interestelares. La gran cuestión es la de siempre jamás: ¿Cómo empezó todo?. El Prof. Ryle decía "no podemos probar la validez de las teorías cosmológicas pero sí probar que alguna de ellas no es válida." Por ejemplo la del "steady-state" o creación continua, según la cual el universo no tiene ni principio ni fin; puesto que la termodinámica exige su continua expansión se ha de estar creando nueva materia para que la densidad sea constante. A medida que las nebulosas primigenias se separan por esa expansión, se forman otras nuevas en los espacios intergalácticos por condensación de materia nueva. Esa es la teoría.

Los radiotelescopistas tienen trabajo para cientos de años, siglos por venir, en los que alguien tendrá ocasión de hablar con el mismo respeto de estas *artes*, hoy nuevas tecnologías.

En el Cavendish se está viviendo ahora ese encuentro universal de la física, la química y la biología hacia la unidad; de este encuentro, feliz para la ciencia, puede resultar cualquier cosa. Habrá que estar atentos. Estamos expuestos a perder el rumbo, lastrados por el peso de la soberbia, faltos de energía ascendente, entendiendo, sí, nuestra materia desnuda, pero alejándonos del principio y del fin, esclavos irredimibles del trabajo frío, sindical o académico, o esclavos del ruido porque no sabemos poner música a nuestro vivir.

Cuando Sir Laurence Bragg (1938) se dedicó a desvelar la estructura de las proteínas utilizando los rayos X con los que su padre y él habían determinado la de los cristales del mundo mineral, empezaba algo que hoy tiene sobrecogido al mundo;

la ingeniería genética. Nació un grupo de Biología molecular con F.H.C. Crick para investigar problemas relacionados con la herencia. Crick y L.D. Watson (1953) sugirieron una nueva teoría sobre la estructura del DNA, la substancia de los genes que dan instrucciones a la célula para que produzca una cierta proteína. El problema era averiguar el "lenguaje químico" o el código en el que se transmitía esa información - lo que se conoce como código genético - que controla el desarrollo de todo organismo desde la planta más simple al hombre, así se llegaría a entender los fenómenos fundamentales de la vida orgánica. Eran las *artes* de lo que hoy se conoce como biotecnología.

Una vez más cabe la pregunta que le hicieron a Rutherford: "¿Y ahora qué más?" para la misma respuesta: ¡quien lo sabe!.

A lo largo de noventa años el Cavendish ha estado presente en el mundo científico cultivando el *arte* de hacer pensando. Su influencia en el desarrollo de la humanidad, su aportación a ese fenómeno de alcance social, económico y político que llamamos nuevas tecnologías, ha sido impresionante. Representa la tradición fecunda de las *artes* en el acelerado progreso presente, es, en sí mismo un fenómeno en la forma y en el fondo del saber y de la acción reposados, pero atentos. Sus veinte Premios Nobel de Física, doce de Química y catorce de Fisiología demuestran que así es como se hace ciencia que luego puede ser tecnología. Mucho han puesto sus hombres pero por encima de todo han puesto su estilo, su manera de hacer. Cuando se analizan en aquella Institución, las tres épocas de toda acción humana - pasado, presente y futuro - se aprecia un transcurso natural sosegado, sin aspavientos. Se ha hecho, se hace, y cabe esperar que se vaya a seguir haciendo lo que hubo que hacer en cada momento y en la forma conveniente. Los Faraday, Maxwell, Thomson, Rutherford, Chadwick, Bragg, Mott, etc. ... no nacieron para descubrir el electron, el núcleo, el neutron, la estructura de una proteína o situarse a unas milésimas del cero absoluto, ni nadie les pidió tanto y tan concreto, pero el destino les puso en el sitio y en el camino. Sitio y camino que siguen existiendo como un símbolo y como un norte: allí están el pupitre que fuera utilizado por todos los Cavendish Proffessors desde Maxwell a nuestros días, allí está la realidad de esos Profesores octogenarios que hacen el "Tour" de la Ciencia en bicicleta, y allí están esos increíblemente simples aparatos para el *arte* de investigar.

Cabe preguntarse, como solemos hacer cuando reflexionamos sobre nuestros Descubrimientos: ¿cuántos hombres lo hicieron?. Pues estos descubrimientos que hemos comentado también los hicieron relativamente pocos. En 1914 había en el Cavendish tan solo veinticinco "research students" (doctorandos), hoy no habrá más de doscientos. Funcionarios, ninguno. Pero la influencia de aquellas escuelas a través de los físicos, químicos y biólogos de todo el mundo que han pasado por ellas es incommensurable. Lo cual demuestra, a mi entender, que es equivocado el camino a la igualdad por la mediocridad generalizada que en España se ha elegido, mediocridad a la que nos ha llevado el desprestigio del maestro, la devaluación del magisterio que tiene que apear con el tumulto de todos los octubres. La sociedad española parece encontrarse cómoda en la ignorancia, en el subsidio y en el esperpento. Asiste al en-

tierra del maestro convencida de que ello es una exigencia del progreso (?) y no se inmuta. ¿Para qué sirve un hijo?. ¿Para qué un maestro?.

Ya sé que Cambridge no es la única Universidad, ni el Cavendish el único laboratorio donde científicos de todas las edades y condición se ejercitan en el *arte* de investigar, pero aquella Universidad y aquel laboratorio han contribuido de forma muy especial y continuada a crear ese capital científico que sustenta las más caracterizadas nuevas tecnologías, como espero haber acertado a exponer en este apretado resumen.

Reconozco que en la larga y apasionada referencia al Laboratorio Cavendish hay mucho de gratitud personal a Cambridge; es verdad. Pero lo que agradecí y agradezco, sobre todo en esta ocasión, es su gran lección, su gran ejemplo en el *arte* de educar e investigar.

Habiendo dedicado la última parte de este discurso, casi exclusivamente, al *arte* de investigar la estructura de la materia, parece lógico que trate ahora de relacionar aquellos descubrimientos de ese *arte* con las más caracterizadas nuevas tecnologías fundamentadas en ellos.

NUEVAS TECNOLOGIAS ELECTRONICA

La tecnología electrónica, cuyo protagonista - el electrón - se descubrió en Cambridge (1897), nació con la válvula termoiónica en la que una superficie calentada en la atmósfera de un gas enrarecido o en el vacío, emitía electrones y éstos, bajo el efecto de fuerzas eléctricas, se comportaban de tal manera que inspiraron dispositivos para generar, amplificar y controlar señales eléctricas. La utilización de estas señales por otros dispositivos adecuados constituyó la ya casi primitiva ingeniería electrónica. Pero la válvula termoiónica que creó esta rama de la técnica se ha visto desplazada por la más reciente tecnología de los ingenios del estado sólido, como el ya popular transistor que apareció hace menos de cuarenta años, con unas consecuencias sin precedente comparable para el presente y el futuro de la humanidad, y en algunos aspectos alarmantes.

Vale la pena seguir la evolución de este concreto fenómeno tecnológico que es la electrónica.

El descubrimiento del electrón tuvo sus precedentes. F. Guthrie (1873) había registrado en un electroscopio ciertos efectos cuando cerca de él se calentaban metales; ahora se sabe que aquellos efectos eran debidos a los electrones emitidos por los metales en caliente. Diez años después (1883), T.A. Edison informaba de que en una lámpara incandescente podría fluir una corriente eléctrica en una sola dirección entre el filamento incandescente y un segundo electrodo. Estos notables hechos hubieron de esperar para ser explicados a que J.J. Thomson descubriera la existencia del electrón y determinara alguna de sus propiedades. Midiendo la relación entre su masa y su carga eléctrica concluyó que los electrones libres, no importa cómo se hubieran obtenido, eran todos idénticos.

Una vez identificados, se experimentó sobre su interacción con la materia. Cuando estos electrones en movimiento colisionaban con un cuerpo se producía una radiación (W.K. Röntgen, 1897) cuyo ejemplo más notable fueron los rayos X. Recíprocamente, J. Elster y H. Geitel (1889) siguiendo la pauta de H. Hertz, demostraron que iluminando metales con ciertas radiaciones, éstos emitían electrones en número proporcional a la intensidad de la radiación recibida, pero su velocidad era independiente de ella; por encima de cierta longitud de onda no se producía emisión. El descubrimiento de estos hechos y la teoría cuántica de M. Planck (1900) condujeron a Einstein (1905) a proponer su ecuación para la emisión fotoeléctrica.

Aunque la conducción unidireccional entre una placa y un filamento dentro de una lámpara se había estudiado al final del siglo pasado, no hubo aplicación práctica hasta 1904 cuando J.A. Fleming propuso su empleo en radioreceptores. Así nació la familia de diodos, triodos, tetrodos y pentodos. La válvula termoiónica en su forma de triodo y posteriores no tuvo competencia como dispositivo amplificador hasta que apareció en transistor de contacto (J. Bardeen, W.M. Brattain y Schockley, 1948-49).

El antecedente del detector cristalino está en las "galenas". Esencialmente, un detector de este tipo consistía en un hilo rígido que se apoyaba por uno de sus extremos afilado, sobre la superficie de un pequeño cristal de un semiconductor, un cristal de galena servía. El hilo era uno de los electrodos y la pequeña mordaza que sujetaba al cristal era el otro. "Pinchando" al azar se buscaba el contacto más sensible.

La aplicación de este dispositivo a nuevos ingenios necesitó mejorar y hacer más segura su respuesta. Se pasó al silicio y después al germanio. A finales de los años cuarenta se había avanzado mucho en la preparación de semiconductores y en el conocimiento básico de la semiconducción, estableciendo que en el fenómeno intervienen, además de los electrones "libres", *huecos* que se comportan como cargas positivas.

Si bien los primeros trabajos para aplicar la termoiónica al control de señales eléctricas fue principalmente académico, al poco tiempo los laboratorios de grandes empresas industriales se ocuparon en encontrar aplicaciones a aquellos descubrimientos y apareció la tecnología de los tubos de vacío. Un proceso análogo ha conducido a los dispositivos e ingenios del estado sólido cuyo representante más genuino se apoderó del nombre (transistor) y a desarrollar las técnicas de integración.

La evolución de la microscopía es un buen ejemplo de aplicación de estos descubrimientos. Después de los trabajos de Ernst Abbe el microscopio se desarrolló hasta donde permitió la ingeniería óptica. Se aumentó el poder de resolución, por ejemplo, utilizando luz ultravioleta o por contraste de fase, pero era evidente que se necesitaba algo nuevo y distinto para llegar más lejos, para poder observar a más aumentos y mejorar la resolución. Lo que iba a producir un cambio radical en la mi-

croscopía pertenecía a un campo inicialmente no relacionado con ella; fue concretamente, la posible difracción de una radiación electrónica.

La teoría del microscopio convencional se había elaborado ya en el siglo XIX, y se sabía por ella que para obtener mayor resolución había que emplear una radiación de mayor frecuencia (menor longitud de onda) que las que forman el espectro visible; por eso se había conseguido mejorar algo iluminando con luz ultravioleta. Pero para poder utilizar los rayos X que se sabían de menor longitud de onda se necesitaba encontrar la forma de refractarlos, problema prácticamente imposible. Sin embargo, las ideas de Louis de Broglie sobre la naturaleza dual del electrón permitió pensar en que un haz de ellos podía ser difractado por la red atómica de un cristal en virtud de su onda asociada; así lo experimentó G.P. Thomson que también logró su refracción utilizando campos eléctricos o magnéticos como un sistema de lentes. Es decir, era posible construir un microscopio utilizando una radiación - la onda asociada al electrón - de una frecuencia muchos órdenes de magnitud mayor que la luz visible. En 1932, se construyó el primer microscopio electrónico (M. Knoll y E. Ruska). El instrumento una vez desarrollado, como ocurre con tantos otros instrumentos que son ahora equipo de rutina de nuestros laboratorios, estaba ya lejos de la capacidad constructiva del artesano tradicional.

Un paso más en la nueva tecnología instrumental, fundamentada en lo averiguado sobre la estructura de la materia, son las recientes microsondas electrónicas EPMA, EDA, etc. o la que aplica la resonancia magnética nuclear (NMR) que puede dar información sobre la estructura molecular, gracias a los estudios previos sobre las propiedades magnéticas del átomo y su núcleo. A finales de los años cuarenta se había descubierto que la frecuencia característica de la radiación electromagnética que absorbe un núcleo, depende de su entorno molecular.

Como se ha visto, la tecnología evoluciona por la recíproca interacción de lo logrado en diferentes campos, se desarrolla alimentándose de sí misma pero bebiendo en la ciencia. En tanto que un hombre genial puede imaginar cómo las tecnologías existentes pueden combinarse para lograr un fin deseado, definir un fin y crear la tecnología para alcanzarlo es otra historia. La aventura del espacio tentó al hombre probablemente desde su primer suspiro, pero aquel sueño no hubiera podido realizarse, antes de lo que lo fue, aun sabiendo lo que ello podía suponer, porque faltaban los ingredientes tecnológicos y el incentivo político que pusiera en juego recursos de todo tipo.

TECNOLOGIA NUCLEAR

Recordaremos brevemente que Rutherford (nac. 1871) había demostrado en 1898 que el uranio emitía dos clases de radiación: una fuertemente ionizante que se absorbía fácilmente, que llamó rayos alfa, y otra más penetrante pero menos ionizante que llamó rayos beta. Más tarde junto con F. Soddy propuso la revolucionaria teoría de que la radiactividad era una desintegración espontánea de los átomos por la cual una clase de materia se transforma en otra que tiene diferentes propiedades químicas y radiactivas, emitiendo a la vez energía en forma de radiación. La teoría tenía soporte experimental aunque en cantidades de materia tan pequeñas que sólo podían ser detectadas por su radiactividad. La teoría era en aquel momento tan atrevida, que

sus colegas de la Universidad de McGill (Montreal) desde donde la propuso, le pidieron que no la publicara por respeto a aquella Universidad. Sin embargo la Royal Society de Londres le eligió Fellow en 1903 y le concedió la Medalla Rumford en 1905.

Antes de volver a Cambridge, a cuya Universidad había llegado desde Nueva Zelanda como becario graduado en Ciencias (1895), fue Profesor de Física en la Universidad de Manchester. Las partículas alfa siguieron siendo objeto principal de sus investigaciones con la colaboración de Geiger. Hubieron de vencer muchas dificultades experimentales hasta llegar a detectar una partícula alfa por medio de su carga eléctrica, sin embargo lo resolvieron con un aparato muy simple y en poco tiempo. Midiendo su carga y dedujeron y demostraron que eran átomos de helio con dos cargas positivas. No deja de ser curioso que Rutherford que, junto con Soddy, había destruido una de las más queridas creencias de los atomistas - la indestructibilidad del átomo - fuese quien produjera la evidencia más convincente de la existencia de los átomos.

Los trabajos de Rutherford sobre la dispersión de las partículas alfa condujo directamente a las modernas ideas sobre la estructura atómica. Sus colegas H.W. Geiger y E. Marsden fueron quienes demostraron que, ocasionalmente, una partícula alfa parecía que se desviaba su trayectoria desplazándose hacia atrás, es decir, moviéndose en sentido opuesto al que llevaba inicialmente.

Rutherford se preguntaría cómo una partícula con tanta energía podía disponer de la enorme fuerza que se necesitaba para retroceder en su camino. Suponiendo que esta fuerza era de naturaleza eléctrica, es decir, que variaba inversamente al cuadrado de la distancia entre la partícula alfa con doble carga positiva y el punto de su desviación, que llevaría una carga Ze , Rutherford calculó que cuando la dispersión se observaba frente a oro, la partícula alfa tendría que penetrar hasta una distancia de 3×10^{-12} cm del centro de desviación o retroceso. Ello suponía que ese centro tenía que ser diez mil veces más pequeño que el diámetro del átomo. Los cálculos y los valores experimentales coincidieron, y así se estableció la imagen *nuclear* del átomo. Pero, ¿por qué era estable?

Según la teoría electromagnética clásica los electrones que rodean al *núcleo* hasta alcanzar un diámetro - el del átomo "completo" - de 10^{-8} cm deberían radiar energía hasta caer, por atracción, en el núcleo con carga positiva opuesta a la suya. Niels Bohr, físico teórico, intrigado por este problema discutió con Rutherford sus experimentos (1912), e, intuitivamente, aplicó el concepto de "quanto" desarrollado por Planck, a las órbitas de electrones negativos circulando alrededor del núcleo de carga positiva, y así ofreció un convincente modelo estable de átomo nuclear.

Los trabajos experimentales de Rutherford casi se interrumpieron bruscamente con motivo de la I Guerra Mundial (1914-1918), pero, aunque con dificultades, siguió observando partículas muy ionizantes - partículas alfa o núcleos de hidrógeno -. El resultado fue que en 1919 Rutherford pudo anunciar otro sorprendente descubrimiento que, sin que tenga nada que ver, coincide con el año de mi nacimiento. Rutherford demostró que las partículas de gran alcance observadas por Marsden

cuando partículas alfa atravesaban una atmósfera de hidrógeno/eran núcleos de éste producidos por la colisión alfa $\rightarrow$ átomo de hidrógeno, y demostró que éstas eran idénticas a las que se obtenían cuando la atmósfera era de nitrógeno. La explicación de que esos *protones* (núcleos de hidrógeno) eran el resultado de una rotura o “desintegración artificial” de átomos normalmente estables como el de nitrógeno, era tan revolucionaria y tenía implicaciones de tanto alcance, que era preciso encontrar la evidencia experimental; esta evidencia la obtuvo con una serie de experimentos admirablemente diseñados.

Así pues, Rutherford no solo demostró la existencia del núcleo atómico y que el núcleo de los átomos radiactivos experimentaba transformaciones espontáneas a núcleos más simples, con desprendimiento de energía, sino que núcleos normalmente estables podían experimentar también transformaciones similares al colisionar con partículas energéticas.

Aquel mismo año (1919) Rutherford sucedió a su maestro J.J. Thomson como Cavendish Professor en Cambridge. Dirigió el Laboratorio con austeridad eficaz y divertida, hecha de latas, cuerdas, plastilina y cordialidad.

En 1920 pronunció la *Bakerian Lecture* en la Royal Society. Habló de la constitución del núcleo y de las fuerzas que le estabilizaban. Recordó que los átomos pesados podían obtenerse a partir de hidrógeno como sustancia primordial “solo si la masa de un *proton* como constituyente de un isótopo, era menor que la que tenía en el hidrógeno. Para explicar esta pérdida de masa sugería lo siguiente: Es muy posible - decía - que un electrón pueda enlazarse con dos núcleos de hidrógeno y posiblemente también con uno. En el primer caso esto supone la posible existencia de una masa de valor “casi” 2 con carga 1, que puede considerarse como un isótopo del hidrógeno. En el segundo caso había que suponer la existencia de un átomo de masa 1 con carga cero en el núcleo. La idea no parecía imposible. Según lo entonces admitido, el átomo neutro de hidrógeno se contemplaba como un núcleo de carga 1 con un electrón asociado a cierta distancia, a cuyo movimiento se atribuye el espectro del hidrógeno. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, podría ocurrir que un electrón se combinase más íntimamente con el núcleo de hidrógeno formando una especie de doblete neutro. Un “átomo” así tendría propiedades nuevas: su campo externo sería prácticamente nulo, excepto muy cerca del núcleo, y, como consecuencia, debería ser capaz de moverse libremente a través de la materia; sería difícil de detectar su presencia por espectroscopía y no sería posible retenerla en un espacio estanco. Por otra parte, podría penetrar fácilmente la estructura de los átomos y, o unirse al núcleo o desintegrarse por efecto de su intenso campo produciéndose, posiblemente, o un átomo de hidrógeno cargado, o un electrón, o ambos.

La existencia de tales “átomos” - seguía diciendo - parece necesaria para explicar la formación de los núcleos de los elementos pesados, ya que si no se suponía la producción de partículas cargadas y con grandes velocidades, era difícil explicarse cómo cualquier partícula cargada positivamente podía alcanzar el núcleo de un átomo pesado venciendo su intenso campo repulsivo.

Esto era, como pueden comprender, el anticipo del *neutron* que correspondió descubrir a Chadwick (1931) como ya se ha dicho.

Como la probabilidad de conseguir una transformación atómica por partículas alfa con la energía de las producidas por una sustancia radiactiva es muy pequeña, Rutherford estimuló el desarrollo de una técnica para obtener partículas de mayor energía que pudieran utilizarse en investigar la estructura del núcleo atómico. John Cockcroft calculó la probabilidad de que protones acelerados por una diferencia de potencial de un millón de voltios pudieran penetrar en núcleos ligeros, y resultó pequeña, pero finita. Rutherford le animó a construir el sistema de aceleración múltiple al que nos hemos referido. Con él Cockcroft y Walton (1932) mostraron que el isótopo del litio de masa 7 se transformaba en dos partículas alfa cuando absorbía un protón acelerado a menos de 1 millón de voltios. Se había logrado la transformación de núcleos por partículas aceleradas artificialmente.

A los noventa años del descubrimiento del electrón, a los setenta de la Bakerian Lecture, a los sesenta del neutrón, la humanidad está conmocionada, agitada, se siente insegura, sin saber bien por qué ante las nuevas tecnologías de la energía nuclear que beben en las *artes* experimentales expuestas. Sin embargo, las nuevas tecnologías al menos en este campo, están obligando por su trascendencia y por su envergadura, a que los gobiernos y los pueblos se entiendan, no tanto porque se teman, como porque se necesitan mutuamente. Creo que éste es un hecho plausible no suficientemente destacado.

Por ejemplo, el reactor Superphenix, conectado a la red internacional de distribución de energía eléctrica hace cuatro años, es la culminación de cuarenta años de trabajos experimentales en la tecnología conocida como *fast-breeder* y de diez años de construcción. Se considera como uno de los mayores proyectos de ingeniería de nuestra era. Se trata de un reactor nuclear que produce calor para una central de potencia "quemando" plutonio pero - ¡oh paradoja de la ciencia nuclear! - produce más de lo que "quema": de las "cenizas" del combustible nuclear se puede obtener suficiente combustible nuevo para recargar el reactor. En esencia, es como una fuente inagotable de energía para un mundo dispuesto a no renunciar a disponer de la suficiente para sus necesidades, sus caprichos o sus vicios.

La idea originaria de la tecnología *fast-breeder* hay que buscarla en Enrico Fermi (1945). Solo unos pocos de los cincuenta reactores nucleares prototipo se inspiraron y diseñaron siguiendo la idea *fast-breeder*.

Hace veinte años se vio claro que ningún país europeo podría seguir por sí solo con el desarrollo de este tipo de reactor a escala industrial. Los impedimentos más serios eran: un elevado coste, los riesgos de financiación de los prototipos, el apremio de la industria, el procesado del combustible. Por eso Francia (EDF), Italia (ENEL), y Alemania (RWE) decidieron colaborar para la construcción y explotación de dos centrales nucleares de potencia de más de un millón de KW equipadas con sendos reactores *fast-breeder* refrigerados con sodio. Esta decisión tomada en 1971 anti-

cipaba el verdadero espíritu de *européismo* en el campo tecnológico, en cuyo campo los países estaban aún separados por barreras institucionales y legislativas; faltaban quince años para que se firmara el Acta Unica Europea (1986) que nos emplaza para 1992.

Para la construcción del primero de aquellos dos reactores empezó a trabajar un equipo de ingenieros, diseñadores y economistas de las tres sociedades participantes. En la organización integrada estaba asegurado que cada uno de los países participantes (Francia, Italia, Alemania Federal, Bélgica y los Países Bajos) contribuiría al desarrollo de la tecnología y tendría, sin restricción, acceso a lo que se ha popularizado como *know-how*. Quedó demostrada la buena voluntad de los asociados al renunciar al derecho a veto en defensa de intereses privados o nacionales. El sitio del emplazamiento (Crepes Malville, Francia) fue una Babel superada en la que las compañías de cinco países trabajaron hombro con hombro. He aquí unos números para que se pueda apreciar la envergadura del esfuerzo: Se emplearon dieciocho millones de horas en el diseño de la central y sus componentes; la vasija de seguridad del reactor tiene veintidos metros de diámetro; para el emplazamiento se reservaron treinta y cinco hectáreas; en los trabajos de construcción participaron 3.250 personas de 125 compañías que emplearon veintidos millones de horas ... La puesta en marcha (enero de 1986) fue una especie de ensayo general para la calidad del conjunto y de cada detalle del diseño así como de la madurez de las tecnologías. La Europa de la ciencia y la tecnología, la del esfuerzo conjunto en el gran acelerador de Ginebra, la del Ariane, la del Airbus, la de la Red Europea de Potencia, dio con el *Superphenix* un paso importante hacia su unidad. El éxito de este proyecto ha determinado que se establecieran nuevos acuerdos de cooperación que se ampliaron a lo que se conoce como el Gran Acuerdo suscrito en 1984 por los Jefes de Estado y de Gobierno de Francia, Alemania Federal, Reino Unido, Italia y Bélgica.

Otro ejemplo en el mismo campo es el del proyecto JET (Joint European Torus). El eventual agotamiento de las reservas mundiales de combustibles fósiles ha planteado la urgente necesidad de encontrar y desarrollar otras fuentes de energía. De éstas la *fusión* nuclear es, en potencia, la más prometedora, aunque su desarrollo comercial no esté previsto hasta mediado el siglo XXI.

La hipótesis de que una serie de reacciones de *fusión* nuclear eran las responsables de la energía del sol fue postulada por primera vez por R. Atkinson y F. Hontermans en 1928, mientras Rutherford y sus colaboradores del Cavendish discutían precisamente sobre la posibilidad de utilizar la energía desprendida en tales reacciones.

Desde hace cuarenta años se vienen realizando muchos experimentos en varios países tratando de producir reacciones de *fusión* en el laboratorio. Las condiciones físicas requeridas para lograr el fenómeno son tan extraordinarias que en ninguno de esos experimentos se han conseguido resultados significativos. No obstante, se ha puesto en marcha el proyecto JET con la esperanza de establecer la posibilidad científica de la *fusión* como fuente de energía y de obtener los datos necesarios para

el eventual desarrollo de los reactores de fusión.

Cuando la materia se calienta a temperaturas muy altas pueden tener lugar reacciones nucleares por colisión de núcleos que se mueven a grandes velocidades. Estas reacciones son las que se conocen como *termónucleares* y son las que se producen en las estrellas incluido el sol de nuestro sistema. De ellas se desprende energía nuclear cuando se utilizan núcleos de los elementos más ligeros. Como estos núcleos ligeros se unen para formar núcleos más pesados, estas reacciones se conocen como reacciones de *fusión nuclear*.

Hay varias reacciones de *fusión* posibles, pero la que parece que va a poder producirse antes, porque es menos exigente desde el punto de vista experimental, es la que tiene lugar entre los núcleos de dos isótopos del hidrógeno: el *deuterio* y el *tritio*. En virtud de esa reacción los núcleos de deuterio y de tritio se funden en uno solo - el del helio - liberando un neutrón y desprendiendo una importante cantidad de energía. Como ambos núcleos tienen carga positiva, se repelerán al aproximarse. Para conseguir esa aproximación y que sea la suficiente para que se produzca la fusión, se les debe proporcionar energía bastante para vencer la repulsión. Como dada la dificultad del fenómeno siempre habrá muchas más colisiones dispersivas que reactivas, se necesitará emplear un gas caliente en el que la distribución de velocidades al azar sea tal que los núcleos puedan chocar repetidamente aumentando así la probabilidad de que se produzca una reacción de *fusión*.

La forma más favorable de producir una reacción de fusión es calentar una mezcla de deuterio y tritio en estado gaseoso a temperaturas muy elevadas. A unos pocos de miles de grados Celsius, los electrones que rodean los núcleos de los átomos ya tienen suficiente energía para liberarse, con lo cual el gas se transforma en una mezcla de igual número de electrones (negativos) y de núcleos (positivos), es decir, de iones. Esta mezcla tiene propiedades muy diferentes de las del gas original - por ejemplo la de ser afectada por campos eléctricos o magnéticos - y constituye lo que se denomina un *plasma*. Si este *plasma* se calienta a decenas de millones de grados Celsius, algunos núcleos se fusionarán formando helio y neutrones; pero la energía desprendida en esa *fusión*, sería mucho menor que la requerida para calentar y mantener el estado de plasma.

L.D. Lawson (1955) calculó las condiciones necesarias para que pudiese haber un rendimiento energético positivo en un plasma *deuterio-tritio*. Estas condiciones eran: 1) calentar el plasma a cien millones de grados Celsius, y 2) confinar un plasma de cierta densidad (n) sin que estuviera en contacto con paredes materiales, durante un tiempo suficiente (T_e) para que el producto $n \cdot T_e$ fuese mayor que 10^{20} núcleos por metro cúbico. El tiempo (T_e) se conoce como tiempo de confinamiento energético y es, esencialmente, el tiempo durante el cual toda la energía se desprendería del plasma. En el proyecto JET, como en la mayoría de las instalaciones experimentales, se utilizan campos magnéticos para confinar el plasma; lo que se pretende con ello es mantener un plasma a 100 millones de $^{\circ}\text{C}$ a una densidad iónica de 10^{20} m^{-3} , durante un tiempo de 1-2 segundos. La presión del plasma confinado a esa tem-

peratura es de tres atmósferas.

Durante la década pasada (1970-80) se obtuvieron resultados estimulantes en los experimentos que se estaban realizando con el sistema TOKAMAK, siglas con las que se designó a la cámara magnética tórica diseñada en la URSS. De los resultados obtenidos en estos experimentos se dedujo que un reactor de *fusión* había de tener grandes dimensiones y una gran corriente de plasma. En 1973 se llegó a un acuerdo de los responsables de la investigación coordinada en Europa para formar un equipo internacional para el diseño de un TOKAMAK mucho mayor que los precedentes con objeto de conseguir unos parámetros de plasma más próximos a los requeridos para un reactor de *fusión*. Los trabajos de diseño se terminaron en 1975. Se proponía una instalación de las siguientes características: radios menores del plasma, 1.25 mm (horizontal) y 2.10 mm (vertical); radio mayor, 2.96 mm; pulso de corriente, 20 segundos; peso de la vasija de vacío, 100 Tm; peso de las bobinas tóricas de campo, 384 Tm; peso del núcleo de hierro, 2.700 Tm.

Acordado el lugar de emplazamiento (1977) (Culham, cerca de Oxford), se puso en marcha el equipo de científicos, ingenieros y administradores en el que participaron los once países miembros de la JET Joint Undertaking (nombre formal del organismo). Los países miembros fueron en un principio los nueve de la CEE (Bélgica, Dinamarca, República Federal Alemana, Francia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, Holanda y el Reino Unido) junto con Suiza y Suecia.

El EURATOM (European Atomic Energy Commission) que también es miembro de la JET Joint Undertaken, aporta el 80% de los fondos, el Reino Unido como país anfitrión contribuye con el 10% y los países miembros (incluido el Reino Unido) contribuyen en proporciones a la importancia de sus programas de investigación sobre *fusión*. Grecia se hizo Miembro del Joint Undertaking en 1983, y es de suponer que Portugal y España lo sean ya.

Terminado el Torus Hall, masivo edificio en el que había de alojarse el reactor, se empezó el montaje del TOKAMAK-JET. El edificio tiene unos muros de hormigón de 2.8 m de espesor como protección contra los neutrones de gran energía que se espera se formen durante la reacción. Está previsto el mantenimiento del equipo y su eventual desmantelamiento por control remoto, ya que los neutrones generados por la *fusión* harán radiactiva toda la instalación a partir de 1990 cuando se estudien los plasmas deuterio-tritio.

En 1983 (25 de junio) se consiguió el primer impulso de plasma, obteniéndose una modesta corriente de 10.000 A durante 1/10 segundos. Al año siguiente se alcanzaron 3.7 MA durante 15 segundos, temperaturas de treinta millones de °C, una densidad de $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, y un tiempo de confinamiento de 0.80 seg. El JET pasó así a ser el experimento de *fusión* más importante del mundo. Hay otros dos grandes TOKAMAK, uno en EE.UU. (TFTR) que empezó a funcionar en diciembre de 1982, y otro en Japón cuyo programa experimental se inició en abril de 1985. Como cada experimento tiene diferentes objetivos científicos, en enero de 1986 se firmó un

acuerdo bajo los auspicios de la Agencia Internacional de la Energía para el intercambio de información entre estos tres grupos.

Como el JET no fue diseñado para utilizar los neutrones producidos en la reacción de fusión en un plasma de deuterio, a partir de ahora se tratará de capturarlos en la zona que envuelve al plasma en que se situará un compuesto de litio que no solo los moderará sino que producirá *tritio*.

Suponiendo que el JET alcance todos sus objetivos se requerirá aún programar y realizar más experimentos en nuevas instalaciones antes de que se pueda construir un reactor nuclear de fusión comercial. El programa EURATOM prevé por lo menos dos pasos previos entre el JET y el reactor comercial: el NET (Nex European Tours) y el DEMO (Demonstrator Reactor). Para complimentar el NET se creó un grupo de trabajo en Garching (Alemania) con objeto de establecer las posibilidades técnicas de la *fusión*, especialmente los problemas de la producción de *tritio* en el "blanco" de los neutrones, la refrigeración y los daños producidos por la radiación en la pared del recinto de vacío, el control del plasma durante largos períodos, la reposición y descarga de los "combustibles" ... El programa DEMO deberá estudiar la viabilidad económica de la *fusión* como nueva fuente de energía.

Queda también por aclarar la base científica de la posible *fusión*. Los recientes desarrollos científicos y tecnológicos en otros campos (aviación, conquista del espacio, comunicaciones) han demostrado que a los primeros resultados de las investigaciones siguen períodos de una rápida evolución que conduce a la aplicación práctica. Cabe esperar que así suceda con la *fusión nuclear* cuando se vayan resolviendo, uno tras otro, los formidables problemas científicos y tecnológicos para hacer de este fenómeno una nueva y caudalosa fuente de energía para la humanidad. Será, según las previsiones de lo casi imprevisible, dentro de cincuenta años, aproximadamente; precisamente cuando en Europa, en particular, empiecen a escasear los combustibles fósiles. ¿Ventajas?: Grandes reservas y disponibilidad de "combustible" (de un m³ de agua ordinaria pueden extraerse 33 g de *deuterio* y aunque el *tritio* no es un isótopo natural del hidrógeno, el diseño de los futuros reactores permitirá obtenerlo por reacción entre el protón y el "blanco" que rodee al plasma); mayor seguridad, y muy pequeño efecto sobre el ambiente si se compara con otras fuentes.

SUPERCONDUCTIVIDAD

En 1908 Kamerlingh Onnes, físico danés, conseguía licuar helio; un hecho físico muy importante, que acababa con el mito de los gases "permanentes". El helio como gas-elemento se había descubierto sesenta años antes pero sólo como constituyente de la cromosfera solar. Hasta 1895 no se descubrió en la Tierra aunque era también componente de nuestra atmósfera.

Kamerling Onnes se esforzó en averiguar si la ley de los estados correspondientes formulada por Van der Waals era universalmente válida. La ley predecía que todos los gases se comportaban fundamentalmente de la misma manera, es decir, que a temperaturas suficientemente bajas todos los gases condensarían al estado

líquido. Una vez que se consiguió licuar al oxígeno y al nitrógeno, nadie dudó que el helio también llegaría a condensarse, pero había que alcanzar una temperatura suficientemente baja. Kammerling lo consiguió al alcanzar los -268.9°C (4.2°K). Se abrió con ello la posibilidad de estudiar propiedades fundamentales de la materia a temperaturas muy próximas al cero absoluto (-273.15°C).

Casi simultáneamente, a principios de siglo se había levantado una controversia sobre si la resistencia eléctrica de los metales se haría infinitamente grande a bajas temperaturas debido a que los electrones conductores se “congelarían en los iones de la red. Esta controversia llevó a Kammerling a medir la resistencia de los materiales conductores a las más bajas temperaturas alcanzables.

Recordaremos que la conducción eléctrica es posible en los metales porque sus electrones de valencia (los más externos) están relativamente “suelos” de los átomos y, por lo tanto, pueden desplazarse más o menos libremente por el cristal metálico y así conducir la electricidad. Por su parte, los átomos, fijos en la red, al “soltarse” uno o más de sus electrones, quedan como cationes.

Kammerling encontró que el oro y el platino ofrecían la misma resistencia al paso de la corriente eléctrica cuando aquella se medía a bajas temperaturas, lo cual atribuyó a las impurezas que contenían los metales ensayados. Por eso se decidió a experimentar con mercurio que es relativamente fácil de purificar por destilación. Las medidas las realizó su colaborador G. Holst en 1911 descubriendo, con gran sorpresa de todos, que la resistencia de una probeta de mercurio se hacía inmedible por debajo de 4.2°K . Se había descubierto el fenómeno de la superconductividad.

El hecho de que la temperatura crítica a la que el mercurio se hace superconductor sea aproximadamente la misma que la de ebullición del helio, es una simple coincidencia.

El experimento histórico con el que Kammerling se convenció a si mismo y convenció al mundo científico de la existencia de un estado de resistencia cero, fue el siguiente: Utilizando una batería hizo pasar una corriente eléctrica a través de un solenoide que se podía poner en cortocircuito y desconectar la batería del circuito. Lo notable fue que cuando se hizo esa operación - cortocircuitar y desconectar la batería - siguió pasando corriente sin pérdida alguna, como pudo comprobarse midiendo el campo magnético generado por el solenoide. En tanto no se hiciera “trabajar” a esa corriente, su flujo seguiría indefinidamente; el experimento más largo duró más de dos años, hasta que una huelga en el ramo del transporte impidió el suministro de helio y se interrumpió. Pero fue concluyente: la resistencia en estado de superconducción es, en cualquier caso, menor que 10^{-12} de la resistencia en estado normal. Teóricamente ha llegado a estimarse que aquella corriente podrían haberse mantenido durante (10^{10}) años, que es un tiempo que se sale hasta de la escala astronómica. El hecho era tan importante que durante años se hicieron en Leyden, residencia de Kammerling Onnes, todo tipo de experimentos para comprobar los resultados. En 1913 K. Onnes recibía el Premio Nobel por sus trabajos en la física de bajas temperaturas.

Pocos fenómenos físicos se han resistido tanto a una explicación teórica. Entre 1913 y 1957 cada año se sucedían varias teorías, lo cual llevó a postular a Felix Bloch que todas ellas eran equivocadas.

En 1957 Bardeen, Cooper y Schrieffer propusieron una explicación de la superconductividad que se conoce como la teoría BCS. Se basa en suponer que existe una débil atracción entre los electrones que se desplazan con la misma velocidad pero en direcciones opuestas y con rotaciones alrededor de sus ejes (spin) también opuestas. La teoría BCS fue muy útil porque permitía explicar prácticamente todas las propiedades de los superconductores, pero se están descubriendo nuevas propiedades que no pueden explicarse. El fenómeno sigue siendo un apasionante tema de investigación.

Dado que, según la teoría BCS, no podía darse la superconductividad por encima de los -248°C , que esas temperaturas tan bajas solo se pueden conseguir con helio líquido (muy caro y difícil de conseguir), que la intensidad crítica (la que un superconductor puede soportar sin dejar de serlo) es poco elevada, y que cuando se le somete a campos magnéticos fuertes pierde también sus propiedades, la superconductividad, sorprendente como fenómeno, no parecía tener futuras aplicaciones prácticas. Esta es probablemente, la razón de que, hasta hace dos años, no hubiera en todo el mundo más de veinte o treinta investigadores cualificados trabajando en este campo. Pero a raíz del descubrimiento del físico suizo Karl Alexander Müller y del alemán Johann Georg Bednorz, el interés por la superconductividad toma un espectacular impulso reflejado en que hoy son más de 5.000 los investigadores que trabajan en este campo.

Karl Müller (1983) tuvo noticia de que los investigadores franceses Bernard Reveau y Claude Michel habían comprobado el comportamiento metálico de algunas cerámicas a bajas temperaturas, y pensó en una posible nueva generación de superconductores. En colaboración con Bednorz investiga óxidos cerámicos de cobre y lantano y encuentran un compuesto que presenta superconductividad a -238°C , es decir a 12°C por encima del límite que había fijado como corolario la teoría BCS.

El anuncio de su hallazgo se publicó en abril de 1986; la noticia se recibió con cierto escepticismo en la comunidad científica internacional. El Prof. Tamaka de Tokio confirmó los resultados en noviembre, y a partir de ese momento, científicos de todo el mundo comenzaron a ensayar con materiales del tipo de los empleados por Müller y Bednorz. Hace menos de dos años (principios de 1987) el Prof. Paul Ching Wu Chu, de Houston, sustituyendo el lantano por itrio logró un material cerámico que es superconductor a -180°C . Esto era muy importante porque se pasaba de tener que enfriar con helio líquido a poder hacerlo con nitrógeno líquido. Los progresos son tan rápidos que los sucesivos acontecimientos se distancian sólo meses e incluso días. En junio de 1987 se obtiene un superconductor a -118°C . En septiembre del mismo año se anuncia superconductividad en un compuesto de cobre y lantano, y de la Universidad de California, en Berkeley, llega la noticia de la puesta a punto de un superconductor a -40°C . Tres días más tarde un equipo de Wayne State University (USA), anuncia que ha conseguido un compuesto metálico de Yttrio que es supercon-

ductor a -327°C . Los resultados se suceden a tal velocidad que no hay tiempo ni de publicarlos. La comunicación verbal de estos progresos hace que sean multitudinarios los Congresos de las Sociedades de Física, y sus sesiones interminables.

Ahora ya se trabaja en perfeccionar los superconductores de la nueva generación. De momento, son quebradizos, poco estables, poco dúctiles, de intensidades críticas aún más bajas que los anteriores, difíciles de producir en forma de hilo o cinta ... Pero el problema fundamental es que aún no se ha interpretado básicamente el fenómeno de la superconductividad y, más concretamente, el de la superconductividad de los óxidos cerámicos ya que estos materiales no tienen electrones "libres" y, además, son contradictorias, con respecto a la teoría, sus temperaturas críticas. No obstante, en los laboratorios se trabaja frenéticamente para conseguir la producción a escala industrial de superconductores por encima de la temperatura del nitrógeno líquido, tratando de llegar a los de temperatura ambiente.

Las consecuencias previsibles son múltiples y muy variadas. Afectarán a la generación, acumulación y utilización de energía eléctrica y a su transporte; a la construcción de superimanes para aceleradores de partículas; a trenes levitantes sobre cojinetes magnéticos, que alcanzarán aún mayores velocidades; se podrá aligerar el peso de los motores; aparecerá otra nueva generación de ordenadores; se mejorará el diagnóstico clínico por perfeccionados aparatos de resonancia magnética nuclear ...

Pero, precisamente, la aplicación en la que se ha puesto mayores esperanzas se refiere a la energía de origen nuclear por *fusión*. Con materiales superconductores se podrían fabricar superimanes de tal potencia que su campo magnético - aunque invisible e infranqueable - crease una especie de recipiente intangible capaz de contener ese "horno", ese "sol" artificial, en el que se alcancen los cien millones de grados Celsius necesarios para producir las reacciones termonucleares.

Rivalizan en esta aventura científico-técnica todos los Estados que han acumulado conocimientos científico-técnicos a un nivel al que puede aplicarse el concepto de crítico. Estados Unidos va a dedicar a estas investigaciones doscientos cincuenta millones de dólares en los próximos tres años, y considera tan importante lo que pueda obtenerse de ellas que sus resultados sólo se discuten en casa y a puerta cerrada. En Japón se "juega" ya con el tren "levitado" después de trescientos años del supuesto experimento de Cabens (1585-1650) en el que conseguía la levitación de una aguja entre dos pedazos de magnetita. Pero el "juego" japonés va en serio, en tanto que el encantamiento de la aguja de Cabens se deshacía cuando sus amigos querían verlo.

Atención, pues, a este aún misterioso fenómeno que habrá que resignarse a contemplar, en el mejor de los casos, desde el proscenio, mientras los nuevos "magos" nos deleitan con un asombroso espectáculo que, curiosamente, ni ellos mismos entienden ... de momento. ¡Qué no será cuando puedan domeñar el secreto!.

Es posible que a desvelar ese misterio colabore el propio misterioso fenómeno haciendo posible la máxima eficacia de los grandes aceleradores, como el del Labo-

ratorio Fermi en Chicago, el *colisionador Tevatrón* protón-antiprotón, donde las partículas se suicidarán por choque a velocidades próximas a las de la luz, dando lugar a fragmentos fugaces e inestables, semejantes a los que, según se cree, existían en el instante cósmico en el que empezó la formación del Universo. Un mundo alucinante el que se ofrece desde estos gigantes tecnológicos que trituran, siempre hasta penúltimas partículas, la materia - siempre que ésta lo sea - y trituran el tiempo hasta reducirle a 10^{-43} segundos.

En un *colisionador*, a diferencia de en un *acelerador*, los haces de partículas circulan por tubos separados y en direcciones opuestas para acabar conducidos a la colisión frontal en la que se hacen trizas. Se me antoja que la *colisión* tiene un significado metafísico; hay colisiones en todos los ámbitos y a todas las escalas. Colisiona la materia, colisiona el espíritu, colisionan las ideas y colisionan los pueblos, consumiendo y produciendo energía en el choque, en la confrontación. En el acelerador lineal de Stanford, por ejemplo, se va a hacer colisionar al electrón y al positrón; como por arte de magia el neutrón se desintegrará y dará lugar a partículas Z. Ya no quedan letras para ese submundo de las trizas atómicas donde se confunden materia y energía. ¿Será verdad que, acabado el abecedario, se habrá acabado la referencia a lo detectable y nos encontraremos con el vacío absoluto, también del espíritu?. ¡Y pensar que todo esto empezó hace noventa años en aquel pequeño laboratorio de Cambridge en el que J.J. Thomson descubriera experimentalmente la primera partícula subatómica identificada, el electrón!.

En pos de las *fuerzas fundamentales*, hace diez años se empezó a pensar en un *modelo estandar* que reduce a *quarks* y *leptones* las partículas subnucleares, cuyo comportamiento está determinado por cuatro fuerzas: la *fuerza fuerte* (?) que mantiene unidos a los núcleos atómicos; la *fuerza electromagnética* que afecta a las partículas que poseen carga eléctrica y que fija la estructura de átomos y moléculas; la *fuerza débil* (?) que sería la responsable de la desintegración radiactiva; y la *fuerza de la gravedad*, que no parece merecer la atención de la física de altas energías.

Se dice que el *modelo estandar* explica todo lo que hoy se sabe deducido de la información obtenida de aceleradores y colisionadores, y, paradójicamente, los físicos de este sublime superestado, o subestados, de la materia allí donde ésta pierde su propia identidad, paradójicamente - digo - los físicos se inquietan por la simplicidad del mismo. Una simplicidad que no lo es tal para los mortales menos físicos, o menos matemáticos, o menos filósofos, ya que en ella intervienen conceptos como "cuerdas", "supersimetría", "gran unificación" ... Esquemáticamente podría decirse que los físicos de partículas, o de altas energías, quieren saber si los *quarks* son el no ya menos, y los físicos nucleares quieren saber cómo se "ajuntan" para componer los átomos de los elementos químicos.

La historia de esta gran aventura metafísica no ha terminado. Lo dicho será antigua *arte* para la tecnología del mañana que tiene previsto construir un artefacto en el que, de momento, se agotan los superlativos; se llama el *Supercolisionador superconductor*. Un monstruo de ochenta y cinco kilómetros de circunferencia en el

que colisionará lo que sea a una energía de cuarenta billones de electrón-voltios, que representa la que podrían producir al mismo tiempo todas las centrales de energía instaladas en la Tierra. A este controvertido proyecto se le presenta como equivalente al que colocó un hombre en la luna y podría estar terminado antes de empezar el siglo XXI.

LOS PARQUES TECNOLOGICOS

Las nuevas macrotecnologías a que nos hemos referido son el resultado de la correcta integración de a veces poco conocidas tecnologías "menores", una especie de artesanía científica que encuentra su lugar, su emplazamiento, en una suerte de barrios de oficios, de los nuevos oficios que trabajan también con primor sus delicadas nuevas *artes*. A estos recintos, generalmente segregados, se les conoce como *parques tecnológicos*.

En los veinte años últimos las naciones del mundo occidental - cuya prosperidad se basaba en que estuvieron en vanguardia de la fabricación de textiles, acero, productos químicos básicos, cerámica, etc. - se han convencido de que su futuro depende de que se sitúen en la vanguardia de las "nuevas tecnologías". A ello les obliga el hecho de que en sus actividades tradicionales tendrían que competir con los nuevos países que se han incorporado a la actividad industrial con una mano de obra que acepta salarios más bajos y más horas de trabajo.

Este cambio de actividad que ahora se llama reconversión, no es, sin embargo, fácil. Las viejas industrias representan grandes inversiones que no pueden abandonarse de la noche a la mañana, y además dan ocupación a una población numerosa. Las nuevas industrias requieren no solo inversiones de capital muy importantes, sino también un nuevo operario a todos los niveles. Para la nueva industria siguen siendo válidos principios bien conocidos: inversiones adecuadas, buen equipo, un producto de calidad y comercializable, una buena gerencia, trabajadores experimentados. Sin embargo el problema más importante es crear un medio, un ambiente, en el que las nuevas ideas puedan traducirse en empresas industriales que sean comercialmente viables; de una u otra forma ha de tenderse un puente entre el genio inventivo - que raramente se da en el negociante - y las organizaciones capaces de comercializar el producto. De este planteamiento han surgido los "parques" científicos y tecnológicos, espacios donde representantes de ambos campos pueden encontrarse. En general, ésto ha supuesto aproximarse a una Universidad prestigiosa, con Facultades de carácter científico y técnico, con facilidades reales efectivas, en investigación. Las empresas acogidas o generadas en estos "parques" suelen ser más bien pequeñas, derivadas o no de una empresa grande, o un establecimiento de la Administración pública. Es importante la proximidad para que sea posible un contacto fácil y frecuente entre sus hombres, lo cual requiere un tercer factor: la existencia o la creación de una atractiva zona residencial con posibilidades para la educación y el recreo. Ejemplos típicos de esta clase de asociación son el *Silicon Valley* y la *Vía 1,28* en EE.UU., y el "*Science Park*" en Cambridge. El éxito de este nuevo planteamiento ha llevado a creer que estos recintos o áreas de la ciencia son una especie de remedio infalible para las economías enfermas o deficientes. Ello ha conducido a que se desarrollen como hongos. Han aparecido "Parques" en muchas partes del mundo desde Francia e Italia a Korea y Tai-

landia, muchos de ellos mal concebidos y condenados al fracaso. Pero la idea, cuando ha surgido y se ha desarrollado de forma espontánea, es buena, fundamentalmente lógica.

Hay muchas razones para este nuevo planteamiento de las relaciones Universidad/industria. En una época de recesión, a las Universidades se las pide que capitalicen su investigación que representa un gasto importante de los fondos públicos. Los Gobiernos estimulan la labor de las Universidades pensando que son nuevos centros potenciales para el crecimiento de la economía y el empleo. Las autoridades locales y los especuladores de la propiedad tienen también sus razones para promover este movimiento; la construcción de estos *Parques*, como cualquier otra empresa constructora, demanda un capital que se arriesgue, y un equipamiento con servicios públicos. Por último estos *Parques* son en sí mismos una aventura estimulante en la que las mentes inventoras pueden encontrar el medio, la acogida que necesitan para el desarrollo práctico de sus ideas.

Aunque la idea es muy buena, insisto, y responde bien al espíritu de estos tiempos, no hay una fórmula simple para el éxito. Lo que tiene éxito en un cierto entramado político-económico-social puede fracasar en otro. En Japón, por ejemplo, a raíz de la Expo '85, se montó la *Tsukuba Science City*. Aquel gigantesco complejo incluye una nueva Universidad para, aproximadamente, 7.000 estudiantes y 2.000 graduados, cincuenta centros de investigación y enseñanza, y treinta y ocho empresas privadas. La población local ha pasado de 80.000 habitantes en 1970 a 140.000. Todo ello ha supuesto una inversión de 3/4 de billón de libras esterlinas. Esta Tecnopolis es el mayor complejo del Japón, donde ya funcionan otras nueve Tecnopolis y hay más en proyecto: la Kumamoto ya en funcionamiento, instalada en la Silicon Island de Kyushu, produce más de la cuarta parte de los circuitos integrados del Japón.

También Israel es un país cuya economía depende del desarrollo rápido de nuevas industrias científicas. El *Weizmann Institute* - un centro para la investigación en ciencia básica en el que trabajan 2.500 personas - ha puesto en marcha un plan diferente. Se ofrece a los empresarios un espacio de 200-300 m², asesoramiento profesional y medios, durante dos o tres años. Si el asunto fracasa se vuelve al punto de partida, hay que empezar de nuevo. Si tiene éxito, el empresario - que necesitará extenderse - se trasladará a unos edificios adecuados a sus necesidades situados en un Science Park adyacente, lo cual le sitúa en buena posición para atraer al capital que acepte riesgo. Este concepto paternalista elimina el problema frecuente de que buenos proyectos no siguen adelante, sencillamente porque la inversión no suele llegar antes de que se demuestre su viabilidad. En los últimos quince años, treinta industrias científicas, con un total de tres mil empleados, se han trasladado al *Science Park*, algunas de las cuales se han establecido directamente sin el previo período de incubación. Otras Universidades de Israel han seguido el ejemplo.

Gran Bretaña se ha situado en una posición intermedia. Se han anunciado planes para más de cuarenta nuevos *Science Parks*, pero no parece un propósito

alcanzable. Algunos no empezaron y otros no son más que establecimientos industriales alrededor de ciudades universitarias. No obstante ha habido algún éxito: el *Cambridge Science Park*, por ejemplo, puede ser el mejor de Europa. Se habla del Cambridge phenomenon por su poder de atracción para empresas de alta tecnología no solo de Gran Bretaña sino de otros países. También la Universidad Heriot-Watt ha creado en los últimos años un Science Park que tiene éxito, y que incluye un número de empresas formadas por personal de la Universidad que explota su propia investigación.

También estos recientes *Science Parks* podrían tener antecedentes remotos. Hace sesenta años se descubrió la ciudad de Mohenjo-Daro en el valle del Indo. Perteneció a la civilización Harappan (de Harappa, la primera ciudad descubierta) que se manifestó como una sociedad urbana entre los años 2400 y 1800 a.de C. y representa la culminación del proceso de colonización de los suelos aluviales ricos de aquel valle. Esta civilización fue notable, principalmente, por sus logros tecnológicos según revelan las excavaciones y las investigaciones realizadas, programadas en la Universidad de Aachen. La calidad de los edificios y los sistemas de drenaje son notables para el tercer milenio antes de Cristo. Las artes se practicaban a gran escala en zonas industriales situadas en los alrededores de las áreas residenciales. Lo espacioso de sus casas, su notable sistema de desagües en Mohenjo-Daro sugiere la existencia de una clase urbana cuyo nivel económico y político determinó y conformó el singular carácter de aquella civilización, distinguida por su gusto en producir cosas útiles y su preferencia para el arte a pequeña escala más que en construir grandes monumentos. ¿Aparecerá alguna ciudad prehispánica de similares características?.

Este movimiento de *Science Parks*, tiene aún que encontrar su camino, y en todo caso adaptarse a las circunstancias locales. Pero está llamando la atención y es significativo en dos aspectos. En primer lugar porque significa tender un puente entre las Universidades y las industrias científicas. En segundo lugar porque significa un cambio de actitud por parte de la Universidad. Hasta no hace mucho al mundo académico le habría repugnado la idea de sacar provecho corporativo de los resultados de sus investigaciones; hoy cuentan con que ello es una forma normal y deseable de suplementar sus ingresos. Pero para ello hay que tener Universidad y tiene que haber empresarios con sensibilidad para la Ciencia.

Es lógico que las nuevas tecnologías monten sus talleres, que son sus laboratorios, y sus jardines, cerca de las Universidades, de las escuelas de sus científicos, cerca de las fuentes. Lo que no es tan lógico, lo que constituye un despropósito es crear los llamados *parques tecnológicos* por decreto y en el desierto, donde sólo unos beduinos de la Ciencia, hombres sabios y azules de beber sus sueños en el cielo, se pierden en la soledad y en el silencio.

¡La Universidad! Buen tema para un estrambote. El sitio para saber aprender, saber qué es lo que hay que hacer, y saber hacerlo bien.

Cuando estaba terminando este discurso, alguien muy próximo me recordó

ésto del libro de la Sabiduría:

“Deseé y me fue dada la inteligencia e invoqué y vino a mí el espíritu de sabiduría ... Y me vinieron todos los bienes juntamente con ella, e innumerable riqueza por sus manos”.

¡Maestros, Señor, Maestros!. Han roto el molde. ¡Con lo fácil que hubiese sido acomodar el sistema establecido a las exigencias de las Ordenanzas de Oficios como la que hemos transcrito en alguna parte de este Discurso!. ¿Qué menos se puede pedir que cuando un ciudadano quiera poner “tienda” de Maestro, sepa su oficio?. Pues, no. Hoy se abre la “tienda” con una sola pieza prefabricada; nada parecido a un *exámen de Oficio*, con saberes demostrados, como las cerrajas, por de dentro y por de fuera, hechas con todo primor e a todo provecho ... Y veedores garantes por conocer ellos mismos el Oficio.

El mismo alguien próximo también me susurró al oído este Salmo:

“Manifiéstese a tus siervos tu obra, y a sus hijos tu gloria. Y la bondad del Señor Dios nuestro sea sobre nosotros, y favorécenos la obra de nuestras manos; sí, favorece la obra de nuestras manos”.

Hablando de Maestros y de manos, y para dejaros ya en paz, voy a terminar con una anécdota que aunque no hubiese sido verdad el sucedido, valdría la pena que lo hubiéramos aprendido:

Cuéntase del artesano Antonio Gutiérrez - que vivía por el año 1800 - y de la Reina Amalia, esposa de Fernando VII. La Reina que, por lo visto, era muy aficionada a bordar, enseñó en una ocasión al maestro Gutiérrez una aguja fabricada en Inglaterra, lamentándose de no poder conseguir una igual en España. Gutiérrez rogó a la Reina que se la prestase para examinarla. Al cabo de unos días se la devolvió a la vez que le entregaba otra hecha por él. Cuando la Reina, asombrada, se deshacía en elogios y le felicitaba por la finura de su aguja, Gutiérrez la advirtió: “Majestad, lo que tiene en sus manos es el alfiletero; la aguja está dentro”.

Señoras y Señores: Reales quejas y Maestros Gutiérrez, eso es lo que necesita España.