

FUSIÓN

Vol. II, núm. 2

NUCLEAR

Primer trimestre de 1984

El abecé
de la física de plasmas



**La revolución
de los láseres**
fin del terror nuclear e
inicio de una nueva era industrial

México: 200 pesos
Colombia: 100 pesos
Perú: 2.000 soles
Venezuela: 10 bolívares
Resto del mundo: 4 dólares

FUSIÓN

NUCLEAR

Vol. II, núm. 2 ISSN 0185-0792
Primer trimestre de 1984

Directores generales

Steven Bardwell
Cecilia Soto

Directores

Robyn Quijano
Lorenzo Carrasco

Consejo Editorial

Demetrio Sodi Pallares
Uwe Parpart
Patricio Estévez

Jefa de redacción

Delia Araujo

Colaboradores

Charles B. Stevens
Marsha Freeman
Luis F. Abreu
Henry Riascos
Jorge Bazúa
Ramón Murillo
Carol Cleary
Salvador Lozano

Dirección artística

Alan Yue

Fusión Nuclear es una revista trimestral producida por la Asociación de Energía de Fusión, con la colaboración editorial de la Fusion Energy Foundation, y publicada por Editorial Benengeli, S.A. Domicilio de la Asociación Mexicana de Energía de Fusión: Francisco Díaz Covarrubias 54 A, 2º piso, Colonia San Rafael, México, D.F. Oficinas de la Fusion Energy Foundation: Box 1438, Radio City Station, New York, New York 10019.

Las opiniones expresadas en los artículos firmados no son necesariamente las opiniones de la Asociación Mexicana de Energía de Fusión, la Fusion Energy Foundation o de los directores o el consejo editorial de Fusión Nuclear. Las opiniones de la AMEF y la FEF se expresan en la sección editorial.

Suscripciones

México: Editorial Benengeli, S.A. Francisco Díaz Covarrubias 54 A 2º Piso, Colonia San Rafael, México 4, D.F. **Colombia:** Asociación Colombiana de Energía de Fusión. Apartado Aéreo 44047, Bogotá, D.E. (favor de girar cheque a nombre de Henry Riascos Landazuri). **Resto del mundo:** Fusion Energy Foundation, Box 1438, Radio City Station, New York, New York 10019.

Tarifas de suscripción

	un año (4 ejemplares)	dos años (8 ejemplares)
México	1100 pesos	2000 pesos
Colombia	550 pesos	1000 pesos
Perú	11000 soles	21000 soles
Venezuela	55 bolívares	100 bolívares
Resto del mundo	US\$ 20	US\$ 40

Impresión: PMR Printing Company Inc., 207 W. 25th Street, New York, New York 10001.

Tiraje de este número: 25,000 ejemplares

Copyright © 1984

Editorial Benengeli, S.A.

Printed in USA/Impreso en EE.UU.

Artículos

9 La revolución de los láseres
por Steve Bardwell

17 El abecé de la física de plasmas
por Steve Bardwell

Secciones

- 2 EDITORIAL
3 LA CORRIENTE DE HUMBOLDT
4 LOS GENIOS
5 COMENTARIO
La central Embalse y la independencia nuclear argentina
- 6 POR EL MUNDO
El Club de Roma promete hambre a todo el mundo
Demuestran las posibilidades del combustible polarizado
Entra en servicio el satélite indio INSAT-IB
Brasil halla un método de separación de isótopos con láseres
Se publica un libro de la FEF sobre armas de rayos
Cancelan un centro de investigación nuclear en México
Programa de desarrollo de la cuenca del Pacífico
Nueva revista científica en Asia
Chingaza podría dar energía a América Central: De la Madrid
Se discuten las tareas más imperiosas de la ciencia médica
- 44 REPORTAJE
Prohíben otro plaguicida en los EU
- 46 CIENCIA Y TECNICA
Medicamentos 'espaciales' contra la diabetes
- 47 LIBROS
Reseña de *La Argentina industrial: eje de la integración iberoamericana*



En el dibujo de la portada se representa un satélite con el arma de rayos más avanzada, un láser múltiple de rayos X, que se ha puesto en órbita por el transbordador espacial Colombiana.



Energía nuclear para reconstruir las Américas

El panorama de la industria nucleoelectrica en Iberoamérica no podría ser más trágico. Forzadas a eliminar cualquier intento serio de desarrollo, para cumplir, en cambio, con las "condiciones" del Fondo Monetario Internacional, las naciones del continente han abandonado casi todos sus planes de aprovechamiento de la energía nuclear.

México y Brasil resultan ejemplos particularmente dolorosos, porque en ambos casos se han abandonado programas que, con todo y sus limitaciones, eran de los mejores de Iberoamérica, y porque esos programas estaban ligados al propósito de acelerar el crecimiento industrial y la modernización general de la economía. Ahora, México liquida Uramex, la empresa que se encargaría de la explotación de los yacimientos uraníferos del país, y las autoridades dicen abiertamente que ello está ligado a la "reducción del ritmo" de crecimiento industrial, que torna "innecesario" producir la cantidad de energía eléctrica planeada originalmente.

En el caso de Brasil, 25 por ciento del personal del programa nuclear ha sido despedido ya, y todo el vasto plan de construcción de centrales nucleoelectricas que se inició con Angra I, está paralizado. La propia central de Angra I está fuera de servicio. Los bancos que se habían comprometido a financiar dichos planes hoy sólo refinancian los intereses de la deuda inicial.

Por más que ciertos funcionarios gubernamentales quieran convencerse a sí mismos de que todo esto no es más que un "aplazamiento inevitable" y que, tal vez en unos años, cuando pase la crisis —Dios sabrá cómo—, se podrá reanudar los programas abandonados, la verdad es que las "condiciones" del Fondo Monetario Internacional están destruyendo la economía de las naciones iberoamericanas de tal modo que, de seguir así, harán prácticamente imposible su recuperación, especialmente por el profundo deterioro de la fuerza de trabajo. Nadie sensato puede fantasear con un mero "aplazamiento".

Pero tampoco es inevitable. Argentina brilla como una excepción en el triste



La Corriente de Humboldt

panorama nuclear iberoamericano precisamente porque los encargados de la materia no aceptaron el "aplazamiento" y han peleado por mantener en marcha sus programas. Con ello, han ejecutado una tarea de importancia estratégica, pues han creado uno de los instrumentos primordiales para garantizar la reconstrucción de la economía nacional, pese a la salvaje destrucción de que ha sido objeto a partir de 1976. Más aún: gracias a ello, Argentina se yergue como eje potencial de la urgente integración iberoamericana, que ha de hacer de la región una potencia industrial de primer orden.

Por supuesto, la condición primera de la integración iberoamericana es romper con las "condiciones" del Fondo Monetario Internacional y enfrentar la crisis financiera de la región con el conjunto de medidas que desde agosto de 1982, en su celebrado trabajo *Operación Juárez*, propuso al continente el economista norteamericano Lyndon H. LaRouche, hoy aspirante a la candidatura presidencial del Partido Demócrata de su país. Forzar la creación de un nuevo sistema financiero y monetario internacional, así como establecer un mercado común iberoamericano, son las únicas vías para evitar que, muy pronto, la hambruna, las epidemias y los conflictos sociales cobren millones de víctimas en la región, para regocijo de los aristócratas maltusianos de los cuales el Fondo Monetario Internacional y los bancos son meros instrumentos.

Las medidas concertadas de Iberoamérica ni han de ser ni se han de interpretar como medidas en contra de los intereses de los Estados Unidos. Antes bien, pocas cosas serían de tanto beneficio para esa nación como colaborar con Iberoamérica en la realización de grandes obras de desarrollo, exportando bienes de capital en gran escala y ampliando, con el crecimiento económico iberoamericano, su propio mercado natural de productos industriales. La transferencia de tecnología siempre ha sido un magnífico negocio para quien la vende y quien la recibe. Pero —más allá de cualquier consideración estrecha o inmediatista del asunto— ese mutuo beneficio es fruto natural de la colaboración entre repúblicas soberanas, que comparten los mismos intereses porque comparten los mismos propósitos morales.

Por otra parte, no basta con la transferencia de tecnología existente. La superación de los graves daños que ha sufrido tanto la economía de las naciones iberoamericanas como la de los Estados Unidos en los años recientes demanda la aplicación de recursos técnicos todavía más avanzados que los que están en uso, de recursos técnicos mucho más productivos, que permitan superar con creces lo perdido y echar bases nuevas para la vida y el trabajo de las generaciones venideras, la verdadera mayoría de la humanidad. Esa es la promesa de los láseres, cuya combinación con la energía de fusión y las computadoras anuncia una nueva revolución tecnológica y económica.

Cuando los Estados Unidos, para poner fin a la amenaza de un ataque nuclear, se disponen a acelerar la investigación necesaria para contar con armas de rayos, con más razón tiene Iberoamérica que actuar para garantizar la transferencia de tecnología avanzada y ganar su lugar en dicha revolución. La cual, por otra parte, podría verse seriamente entorpecida si los Estados Unidos, en contra de sus propios intereses vitales, dejan que el Fondo Monetario Internacional arrastre a Iberoamérica a una situación de inevitable incumplimiento formal de los pagos de su deuda, con la consecuente crisis generalizada del sistema crediticio internacional, y, muy específicamente, de la gran mayoría de los bancos estadounidenses. El programa de *Operación Juárez* es indispensable también para garantizar la defensa militar de Occidente.

Iberoamérica, claro está, no ha de limitarse a recibir tecnología avanzada. Sólo racistas irredentos sostendrían que no puede crearla. En el marco de la integración iberoamericana, la colaboración entre las naciones de la región debe dar nacimiento a varios institutos politécnicos internacionales, dedicados primordialmente a la física de plasmas, la ingeniería de láseres, la automatización industrial y la ingeniería genética. Su rama andina sería la ejecutora de la "segunda expedición botánica" que propusiera el presidente colombiano Belisario Betancur.

Las naciones iberoamericanas no tienen por qué conformarse con menos. Sobre todo cuando menos puede significar la muerte.

Apreciado doctor Franklin:

Quiero esta vez someter a su ilustrada atención una curiosa idea que oí no ha mucho en labios de un ecólogo y defensor de los recursos bióticos en estas tierras de lo que fue la Nueva España. Llegado a asesor o comisionado de algo que no recuerdo bien, mi interlocutor se dedicaba a redactar un sesudo estudio ecogestáltico —así dijo él— cuando arribó a su genial idea.

Debo advertir, antes de continuar, que si el hombre se vuelve famoso y llega usted a ver su fotografía en los diarios, no debe usted engañarse por las apariencias. Si anda barbudo y algo desgredado no es porque le agrada en demasía; me explicó que ello le ha sido necesario para ganarse respeto como intelectual de valía y hombre sabio. "Ningún político bañado y planchado, sabedor de sus propios alcances, me creería si fuera tan pulcro como él", fueron sus palabras. En cuanto a la mirada vidriosa, creo que debemos atribuirle a sus muchos desvelos.

He aquí que el notable estudioso de la ecología ha llegado a la conclusión de que la contaminación ambiental es más antigua y ha causado más daños de lo que habitualmente se reconoce. "De hecho, la cosa empezó hace unos tres mil millones de años", me dijo con la mirada fija en la eternidad. "Cuando a algunos organismos, sin tener en cuenta la opinión mayoritaria, se les ocurrió utilizar un nuevo pigmento capaz de captar la energía solar, se dio el primer paso hacia el suicidio. Ahora estamos ya al borde del abismo, y todavía hay quienes quieren seguir en la misma dirección. . ." Desde luego, nuestro personaje externaba sus juicios sobre la fotosíntesis.

"¿Quiere usted decir que la clorofila es una especie de antecesora de los reactores nucleares?", le pregunté un tanto inseguro. "Exactamente", respondió. "La fotosíntesis trajo consigo el primer gran desastre ecológico que se recuerde; la Tierra se llenó de oxígeno, gas altamente venenoso para la

Los Genios

Los Genios Verdes de Pemex

El codiciado galardón que otorga esta columna a quienes con sus acciones abren nuevos horizontes al saber humano le toca esta vez a la reverdecida persona del director de Petróleos Mexicanos, Mario Ramón Beteta. Al dar luz verde a la campaña de propaganda que inunda a México y que nos informa de que "lo verde es vida", "para PeMex el ocelote es tan importante como el petróleo", "el banano es tan importante como el petróleo", y cosas así de geniales, ha creado un gran fermento entre los dedicados a la filosofía de la naturaleza.

En varios centros mexicanos de investigación científica se indaga en estos momentos sobre el *índice de reconversión energética* del ocelote y del banano. Se trata de averiguar, por ejemplo, cuántos ocelotes—sí, esos mininos salvajes que habitan el sureste mexicano—habría que utilizar, y cómo, para mover, digamos, una planta siderúrgica como la de Las Truchas. Algunos subrayan, por otra parte, que mediante el método de *frotación directa* del banano, se podrían obtener tantos megavatios, que podría declararse en obsolescencia a la famosa central nuclear de Laguna Verde. La polémica se extiende hasta la determinación de cuántas toneladas de banano equivalen a un barril de petróleo (en kilocalorías, se supone, aunque no hay unanimidad en cuanto a la unidad de medida, porque no faltan los que estiran y retuercen más las cosas; pero la multitud de posturas, dicen connotados sociólogos de la UNAM, es lo que da paso a la creatividad).

Profundos estudios socioeconómicos muestran, asimismo, que la campaña es parte de una genial estrategia para vincular los planes de PeMex a las metas del Plan Nacional de Desarrollo, según lo integró otro genio reverdeciente, Carlos Salinas de Gortari. En un proceso acelerado, quemando etapas, señalan los *estudiozoos*, México puede llegar a la sociedad posindustrial; sin necesidad de pasar por la industrialización! Dicen que cuando Salinas lo logre le darán el premio Nobel y desde Milton Friedman hasta Lawrence Klein se morirán de envidia.

Una idea de los alcances de la estrategia la dieron los del Movimiento Cívico Latino Nacional, émulos colombianos del movimiento verde germanooccidental:

el motor de la recuperación económica podría ser la legalización de la yerba verde, dicen. Ello fomentaría el turismo, el turismo la construcción de hoteles, y así sucesivamente. Como ejemplo ponen a México: "México y España han mimado su turismo, la industria sin chimeneas. Trae folklore internacional, cultura, paz y dólares". La paradoja que enfrentan los científicos de PeMex, es que, como dicen en Colombia, "si uno quema marihuana no funciona la banana".

mayoría de los organismos entonces existentes, que perecieron sin duda por millones, víctimas del crecimiento desmedido de la industria. . . . perdón, de los organismos poseedores de clofifila", explicó con tono encendido,

"Profesor", le dije, "pero la abundancia de oxígeno permitió que surgieran otros nuevos microorganismos. . . ." No pude terminar la frase. "A costa de los derechos humanos de las bacterias anaeróbicas", exclamó. "Mas eso no es lo peor. La realidad es que esos nuevos organismos que usted menciona fueron un nuevo truco para aumentar nuestra dependencia del exterior: los organismos fotosintéticos, dependientes del Sol, estaban condenados a muerte por su explotación desmedida del bióxido de carbono,

pero los organismos respiradores vinieron a darles éste a cambio de depender de ellos", dijo limpiándose las barbas con el dorso de la mano y éste en el cabello.

Aproveché que se detuvo para tomar aire y le pregunté si consideraba la respiración como otro paso hacia el abismo al que antes había hecho referencia y del cual esperaba yo alguna descripción al menos somera. "Sospecho, doctor Humboldt", me dijo a media voz, "que usted o no me ha comprendido todavía o intenta tomarme el pelo" (no sé, desde luego, de dónde sacó esto último). "Es evidente", agregó, "que cada nuevo paso en esta carrera de renovación tecnológica a toda costa ha sido de mayor magnitud que el anterior y que el desequili-

brio que se introduce es cada vez peor. Si no lo impedimos con la acción revolucionaria oportuna, pronto la contaminación ambiental invadirá el espacio extraterrestre y empezará a introducir formas de vida extrañas a los valores y a la idiosincracia de otros planetas."

Tal es la novedosa doctrina que este hombre presentará en una próxima reunión de planeación integral de algo. Lo único que ignoro son las recomendaciones que hará: no quise preguntarle qué entiende por "acción revolucionaria oportuna", porque cada vez le vi más ganas de platicar de bulto.

Lo saluda con cordial afecto

Humboldt

Por el mundo

EL CLUB DE ROMA PROMETE HAMBRE A TODO EL MUNDO

En Budapest, a mediados de octubre, el Club de Roma realizó otro de sus espeluznantes congresos dedicados a convencer al mundo de que tiene que poner alto al crecimiento de la población y al avance de la técnica. Esta vez, la novedad fue la presentación del concepto de "capacidad de sostén", cocinado hace poco a pedido de Aurelio Peccei, presidente del club, y su amigo Alexander King, enemigo declarado de "la gente de piel oscura".

El cuento es que, según las computadoras que ayudan a pensar a Peccei y socios, existe una densidad de población máxima sostenible, determinada por las características físicas de la tierra y su grado de desgaste a causa de la agricultura, principalmente. Si se rebasa la capacidad real de la tierra para sostener a la población, habrá hambre. Según dijeron en Budapest los autores de la novísima idea, no hay manera de alimentar a los seis mil millones de bocas que habrá a fin de siglo.

"Es necesario que Europa, la Unión Soviética y Japón empiecen a pensar en su propios pan, porque las fuentes de granos Texas y Iowa se van a secar. Tienen que pensar en nuevos productos agrícolas que no provoquen esa erosión que todo el mundo ha provocado hasta ahora. Más bien deben pensar en cómo obtener alimentos de los árboles: el futuro está en las nueces y el aceite que se puede extraer de ellas", dijo uno de los expertos del Club.

El propio Peccei, en una entrevista con Radio Vaticano, emisora que dirige la Compañía de Jesús, abogó por la reducción drástica del consumo de carne y cereales, y en favor de una dieta basada "en los frutos naturales de la tierra". El ex funcionario de la Fiat y la Olivetti propuso eliminar la agricultura moderna, "que consume demasiada energía y emplea máquinas excesivamente grandes", seguramente para garantizar que sus predicciones de hambruna se cumplan sin falta.

DEMUESTRAN LAS POSIBILIDADES DEL COMBUSTIBLE POLARIZADO

El Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, de los Estados Unidos, ha culminado una serie de simulaciones de computadora y estudios teóricos que confirman las inmensas posibilidades que ofrece la polarización del combustible en la producción de la reacción de fusión mediante confinamiento inercial. Según los informes, las probabilidades de empezar a producir energía "podrían aumentar hasta diez veces", tal como lo previeron desde agosto de 1982 los expertos de la Fundación pro Energía de Fusión, FEF, de los Estados Unidos.

A principios de octubre de 1983 se informó, en una conferencia celebrada en Londres, que los estudios del Livermore concluyeron que, gracias al aumento de la reactividad que se logra por el "alineamiento" del espín de los núcleos del combustible, se reduciría unas tres veces la energía necesaria para encender la reacción termonuclear. Además, la polarización del combustible hace que la energía que se obtiene presente direccionalidad, lo cual, a su vez, intensifica la combustión y aumenta la eficiencia de la reacción.

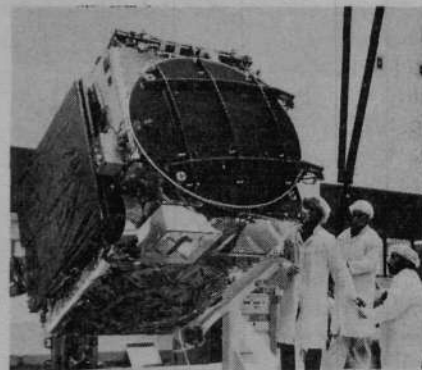
ENTRA EN SERVICIO EL SATELITE INDIO INSAT-IB

El INSAT-IB, satélite artificial de diseño indio lanzado desde el transbordador espacial norteamericano Challenger, entró en servicio al quedar situado en su órbita geostacionaria a 36.000 kilómetros sobre la línea del ecuador y abrir sus paneles de captación de energía solar. El nuevo satélite artificial de India es de función triple: telecomunicaciones, retrasmisión de señales de televisión y medición meteorológica, lo que lo hace único en su tipo.

El INSAT-IB forma parte de un complejo que requiere dos satélites idénticos,



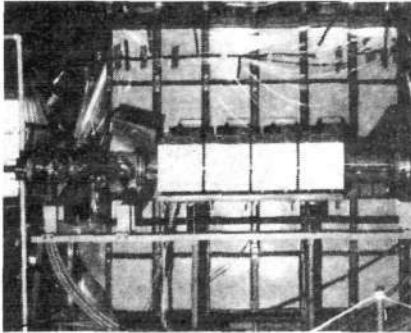
El Club de Roma quiere que los países en vías de desarrollo sólo tengan agricultura de pico y pala. Arriba, campesinos chinos.



El satélite indio INSAT-IB.

Por el mundo

estacionados en órbitas fijas que vean hacia el océano Indico. El INSAT-IB será el satélite principal, secundado por el INSAT-IC, que se colocará en órbita, según planes, a mediados de 1986.



Este es el reactor de fusión nuclear brasileño, el Tupã, que es un sistema tetapinch de confinamiento no toroidal y calentamiento del plasma por implosión magnética.

BRASIL HALLA UN METODO DE SEPARACION DE ISOTOPOS CON LASERES

Según informaciones del diario *O Estado de São Paulo*, el equipo de investigadores brasileños encabezado por Sérgio Porto, fallecido el año pasado, y su sucesor, el profesor Chin Tsu-lin, ha perfeccionado un método efectivo de separación de isótopos con rayos láser. El método es aplicable tanto a la producción de agua pesada como al enriquecimiento de uranio. La información fue dada a conocer en un simposio sobre aplicaciones de los láseres, dedicado a la memoria de Sérgio Porto.

SE PUBLICA UN LIBRO DE LA FEF SOBRE ARMAS DE RAYOS

Un equipo científico de la Fundación pro Energía de Fusión (FEF), de los Estados Unidos, escribió en septiembre un libro de 176 páginas sobre armas de rayos, titulado *Beam Defense: An Alternative to Nuclear Destruction*. Lo publica Aero Publisher, Inc., la casa editora de libros sobre aviación más grande del mundo.

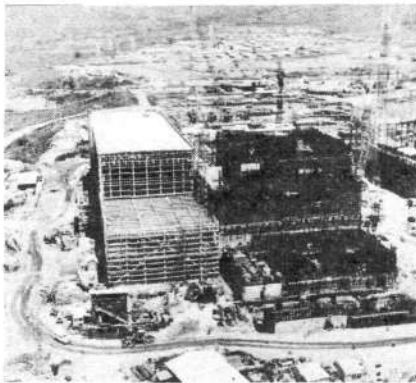
"*Beam Defense* va dirigido al lector no profesional, y presenta en detalle la posibilidad inmediata de implementar el plan del presidente Reagan de aplicar las técnicas de generación de rayos de energía en la defensa nacional", dijo Paul Gallagher, director ejecutivo de la FEF. El libro describe en qué consisten las armas de rayos, cómo funcionan y qué efectos tendría en la economía civil el esfuerzo científico, técnico e industrial necesario para producir las y emplazarlas. *Beam Defense* está abundantemente ilustrado y tiene 16 páginas a todo color. Está a la venta en Aero Publishers, 329 Aviation Road, Fallbrook, CA 92028, al precio de 7.95 dólares.

CANCELAN UN CENTRO DE INVESTIGACION NUCLEAR EN MEXICO

Apenas dos meses después de que el gobierno mexicano cerró su empresa de explotación de los recursos uraníferos, Uramex, se ha anunciado la cancelación del proyecto de construir un Centro de Ingeniería de Reactores, el cual se erigiría en el estado de Sonora, al noroeste del país. Con ello, el programa nuclear mexicano queda reducido prácticamente a la central nucleoelectrónica de Laguna Verde y el ya antiguo centro de investigaciones de Salazar.

El Centro de Ingeniería de Reactores se planeó durante el gobierno de José López Portillo, como parte de la ampliación del programa nuclear del país. Originalmente se escogió para ubicarlo un sitio cercano al lago de Pátzcuaro, en el estado de Michoacán, pero se le tuvo que buscar nueva ubicación cuando el gobernador Cuauhtémoc Cárdenas cedió a la ruidosa campaña de oposición que hicieron los reducidos grupos ecologistas del país, capitaneados por un peculiar "periodista", Adip Sabag, vinculado con el Departamento de Estado norteamericano, y un médico, Arturo Aldama Hermosillo, que en otros tiempos trabajó para el espionaje soviético.

México está por dar a conocer su nuevo plan de energía, aunque han transcurrido varios meses de la fecha en que se suponía que quedaría integrado, lo que se considera señal de que existe todavía un intenso debate interno sobre el monto de la inversión y las obras necesarias en este renglón. Se espera que tan pronto se publique el plan se reinicien los trabajos del segundo reactor de Laguna Verde, suspendidos ya casi por un año.



La nucleoelectrónica mexicana de Laguna Verde, en construcción.

PROGRAMA DE DESARROLLO DE LA CUENCA DEL PACIFICO

Más de 500 personas, entre diplomáticos, analistas de Asia y funcionarios de los gobiernos de diversos países, se dieron cita el 15 de septiembre en Washington para escuchar la exposición del programa de 50 años de desarrollo de la

Por el mundo

cuenca del Pacífico presentado por el semanario *Executive Intelligence Review* en colaboración con la Fundación pro Energía de Fusión.

El aspecto medular del plan es la construcción de cinco gigantescas obras de infraestructura: un canal que atravesase el istmo de Kra en Tailandia; un complejo agrícola e hidroeléctrico en el sureste de Asia; un plan de aprovechamiento de las corrientes del Ganges y el Bramaputra, en India; un canal que atravesase China de norte a sur; y un segundo canal de Panamá.

El principal orador de la reunión, Lyndon LaRouche, fundador de *Executive Intelligence Review*, dijo a los asistentes que "La política exterior se hace yendo a los países a sugerir temas para discutir, para crear un consenso de trabajo para desarrollar la agricultura y la infraestructura, orientar la política de inversión, así como satisfacer los objetivos de educación y empleo del país. Es entonces cuando puede haber cooperación para lograr esos objetivos y llevar a cabo adelantos técnicos".

NUEVA REVISTA CIENTIFICA EN ASIA

El primer número de *Fusion Asia*, revista trimestral en inglés sobre ciencia, tecnología, energía y economía, entró en circulación en Nueva Delhi, India, en septiembre. *Fusion Asia* se publica bajo la dirección de Ramtanu Maitra, de Nueva Delhi, en colaboración con la Fundación pro Energía de Fusión. Estará a la venta en toda Asia, con centros de distribución en Sri Lanka, Bangladesh, Pakistán, Tailandia, Malasia, Singapur, Indonesia, las Filipinas y Japón. El primer número contiene como artículo de fondo una comparación técnica entre las diferentes fuentes de energía y demuestra la ineficacia de las llamadas fuentes alternativas de energía blanda.

CHINGAZA PODRIA DAR ENERGIA A AMERICA CENTRAL: DE LA MADRID

Miguel de la Madrid, presidente de México, en un mensaje dirigido a Belisario Betancur, presidente de Colombia, señaló la posibilidad de que, mediante la interconexión de los sistemas eléctricos de ambos países, la central hidroeléctrica de Chingaza contribuya a surtir de energía a América Central. El gobernante mexicano envió sus felicitaciones al pueblo y al gobierno colombianos con motivo de la inauguración del complejo, en cuya construcción tomó parte importante una empresa mexicana de ingeniería.

SE DISCUTEN LAS TAREAS MAS IMPERIOSAS DE LA CIENCIA MEDICA

"La Ciencia Medica y la Lucha en Contra el Genocidio" fue el título de la conferencia realizada el 16 de septiembre en la ciudad de Washington por el Club de la Vida y en la cual participaron varios miembros del equipo de la Fundación pro Energía de Fusión (FEF). El Club de la Vida es una institución antimalthusiana internacional que se fundó en octubre de 1982 en Roma y ha celebrado ya cientos de conferencias en docenas de ciudades en pro del desarrollo industrial y cultural de todas las naciones.

El doctor John Grauerholz, director de ciencias de la salud de la FEF, analizó la rápida difusión de epidemias que ha aparecido como resultado de la mala nutrición y la falta de sanidad. "No podemos pretender la inmoral y utópica solución de aislar a los Estados Unidos y al resto del sector avanzado del holocausto ecológico mundial", dijo Grauerholz. "Se tiene que generar de inmediato un renacimiento de la economía mundial, antes de que mueran millones y la hambruna azote a los propios Estados Unidos".

Posteriormente, el doctor Ned Rosinsky explicó la importancia que tiene para la ciencia médica la ejecución de un programa de emergencia de defensa civil, tal y como lo ha propuesto Lyndon H. LaRouche, dirigente de la Fundación pro Energía de Fusión. El cardiólogo Demetrio Sodi Pallares, presidente honorario de la Asociación Mexicana de Cardiología, explicó cómo ha logrado mejorar el metabolismo de sus pacientes a base de una dieta libre de sodio pero con alto contenido de potasio, que contribuye a combatir el envejecimiento.



Special Feature: INDIA BUILDS A TOKAMAK!

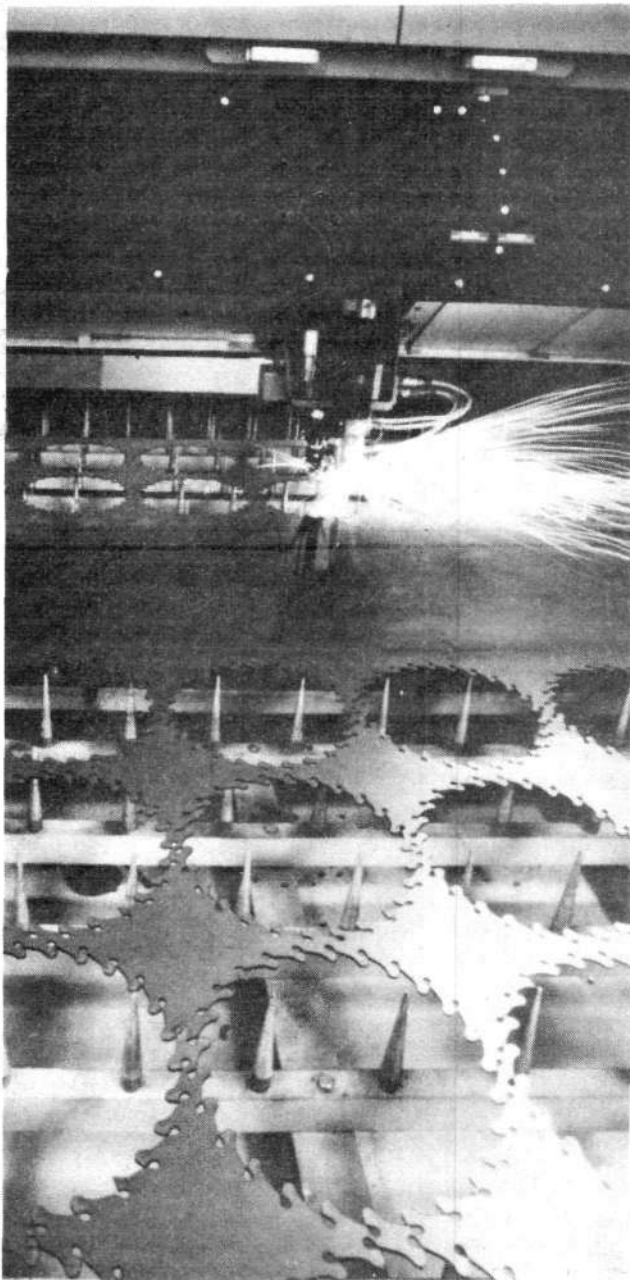
Fusion Asia, la nueva revista científica asiática.



El doctor Demetrio Sodi Pallares durante su presentación en la conferencia del Club de la Vida sobre medicina en Washington.

La Revolución de los Láseres

por Steven Bardwell



Cortesía de Coherent, Inc.

NOTA DE LA REDACCION

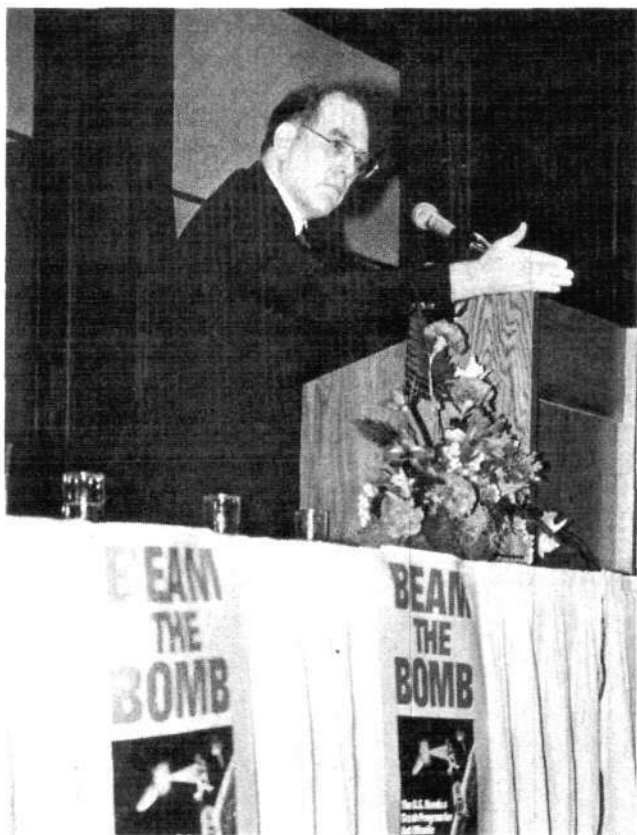
En febrero de 1982, el economista norteamericano Lyndon H. LaRouche, en un discurso pronunciado en Washington, hizo un llamado a que se iniciase una nueva carrera de armamentos entre los Estados Unidos y la Unión Soviética: la carrera por erigir defensas eficaces contra proyectiles balísticos intercontinentales, defensas cuyo elemento principal sería el empleo de armas de rayos. Un mes después, LaRouche publicó un detallado documento sobre el mismo tema, en el que explicaba por qué sólo las armas de rayos pueden poner fin a la era del terror termonuclear.

Ya antes, la Fundación pro Energía de Fusión, de los Estados Unidos, creada en 1975 a iniciativa del propio LaRouche, había publicado una gran cantidad de materiales en pro del empleo de rayos láser y otros instrumentos similares en la defensa estratégica y la industria de este país. Desde 1976, la FEF ha dado a conocer los avances logrados por los científicos y técnicos soviéticos y estadounidenses en la materia, ha planteado los graves daños infligidos por Henry Kissinger y Robert S. McNamara a los servicios armados de los Estados Unidos, y ha señalado la gran delantera que la URSS le lleva a los Estados Unidos en materia de armas de rayos.

Tras el planteamiento de LaRouche de la necesidad imperiosa de iniciar un programa de urgencia para contar con ese tipo de armamento a la brevedad posible, y hacer de esa tarea el eje de la genuina recuperación económica de los Estados Unidos, la FEF redobló sus esfuerzos. En julio de 1982, el doctor Steven Bardwell, director general de las revistas Fusión y Fusión Nuclear, publicó un informe científico-técnico sobre las armas de rayos, que cubre los tipos principales de estas armas, su posible calendario de producción y las derivaciones técnicas de uso civil que tendrían. LaRouche y otros miembros de la FEF han participado desde entonces en muchos encendidos debates sobre el tema en diversas ciudades de Europa y los Estados Unidos.

Como es sabido, el 23 de marzo de 1983, el presidente Ronald Reagan pronunció un discurso televisado en el que anunció una nueva doctrina estratégica norteamericana: la sobrevivencia mutua asegurada; y puso en marcha un programa de investigación científica y técnica para crear la nue-

La productividad de una máquina que corta con rayos láser es 5 a 10 veces superior que la de las técnicas actuales.



Lyndon H. LaRouche, precandidato presidencial demócrata, en su presentación en Washington, en abril de 1983 explica al público presente la importancia de las armas de rayos para acabar con el terror termonuclear.

va generación de armas de defensa estratégica que la FEF y algunas otras voces sensatas, como la del doctor Edward Teller, venían proponiendo. Reagan ofreció a la Unión Soviética la posibilidad de compartir los conocimientos técnicos necesarios para garantizar el equilibrio estratégico entre las dos grandes potencias y la paz mundial.

Este gran paso adelante sacó de quicio a los dirigentes soviéticos —que daban por asegurada su supremacía— y a los círculos occidentales que por tres décadas han basado en el “equilibrio del terror nuclear” sus arreglos con Moscú. La reacción de Moscú llegó al extremo de amenazar con un ataque nuclear preventivo a los Estados Unidos de empeñarse éstos en producir y emplazar armas de rayos. Aun así, en la conferencia científica internacional sobre la guerra nuclear celebrado a fines de agosto en el Centro de Cultura y Ciencia Ettore Majorana, la delegación soviética, encabezada por el doctor Yevguenii Velijov, aceptó participar en la formación de un comité de cien científicos norteamericanos, soviéticos y europeos para examinar la factibilidad de emplazar esos medios de defensa antiohetes.

Poco después la Unión Soviética derribó sin justificación alguna una aeronave comercial coreana, matando a sus 269 ocupantes; y los científicos soviéticos que acudirían al seminario Rayos, 1983, celebrado en los Estados Unidos a mediados de septiembre, cancelaron su asistencia. El presidente Yuri Andropov ha hecho una serie de inoperantes

propuestas sobre conteo de ojivas y cosas por el estilo, dirigidas más que nada a presentarse como el campeón de la paz, al tiempo que la URSS trata por todos los medios de desplazar de la presidencia de los Estados Unidos a Ronald Reagan y hacer que en las próximas elecciones triunfe alguno de los aspirantes demócratas adheridos al movimiento pacifista antinuclear.

En el propio gobierno de los Estados Unidos, la oposición a la doctrina estratégica del presidente Reagan se ha concentrado en el Departamento de Estado y en otros sectores donde pesa la influencia de Henry Kissinger. Hay quienes disfrazan su oposición con la línea de que, “por ahora”, sólo se requiere un programa de investigaciones de laboratorio, para determinar en algún remoto futuro qué armas nuevas vale la pena fabricar. Los jefes soviéticos, desde luego, no piensan lo mismo en relación con su propio programa de armas de rayos, menos ahora que los Estados Unidos parecen por fin decididos a entrar en la carrera.

El siguiente artículo del doctor Bardwell se basa en una exposición que hizo ante el seminario celebrado en noviembre de 1982 en Washington bajo el patrocinio de la Fundación pro Energía de Fusión. Forma parte de un libro de próxima publicación.

La posición general de los movimientos pacifistas —y en particular de los que exigen el “congelamiento” de las armas nucleares— parte de la premisa de que la ciencia es ingobernable y que, para sujetarle las riendas, hay que ponerle tope al avance de la técnica.

La ciencia, según sostienen explícitamente muchos de los dirigentes del pacifismo contemporáneo, es la causa fundamental de la guerra. Es un punto de vista por demás irracional, directamente emparentado con el supuesto “ecologista” de que la ciencia y la técnica amenazan la existencia del hombre (o al menos de la “raza blanca”, según algunos exponentes radicales de esa doctrina, como Alexander King, fundador del Club de Roma). La verdad es que sólo con el progreso de la ciencia y la técnica puede la humanidad alentar la esperanza de sobrevivir en las décadas futuras y dar base a los procesos políticos y sociales en los que se sustente la paz.

Para concretar: las armas de rayos y las derivaciones económicas de su producción y emplazamiento son los cimientos de la paz mundial. No son lo único que se necesita, pero son indispensables. Sin estas armas y sin los avances científicos y técnicos que suponen, la paz mundial es imposible a la larga.

Históricamente, no es raro hallar semejante conjunción entre un elemento técnico concebido inicialmente con propósitos militares y la garantía de la paz mundial. En el siglo 20, tenemos una serie de adelantos técnicos que se hicieron al inicio pensando en sus aplicaciones militares, y luego hallaron aplicaciones más vastas y significativas en usos pacíficos del orden civil.

Hay tres casos bien conocidos. El primero es la aeronáutica y el transporte por aire. La transportación aérea era al principio un adelanto esencialmente militar. Fue gracias al impulso que recibió la aeronáutica en la Segunda Guerra

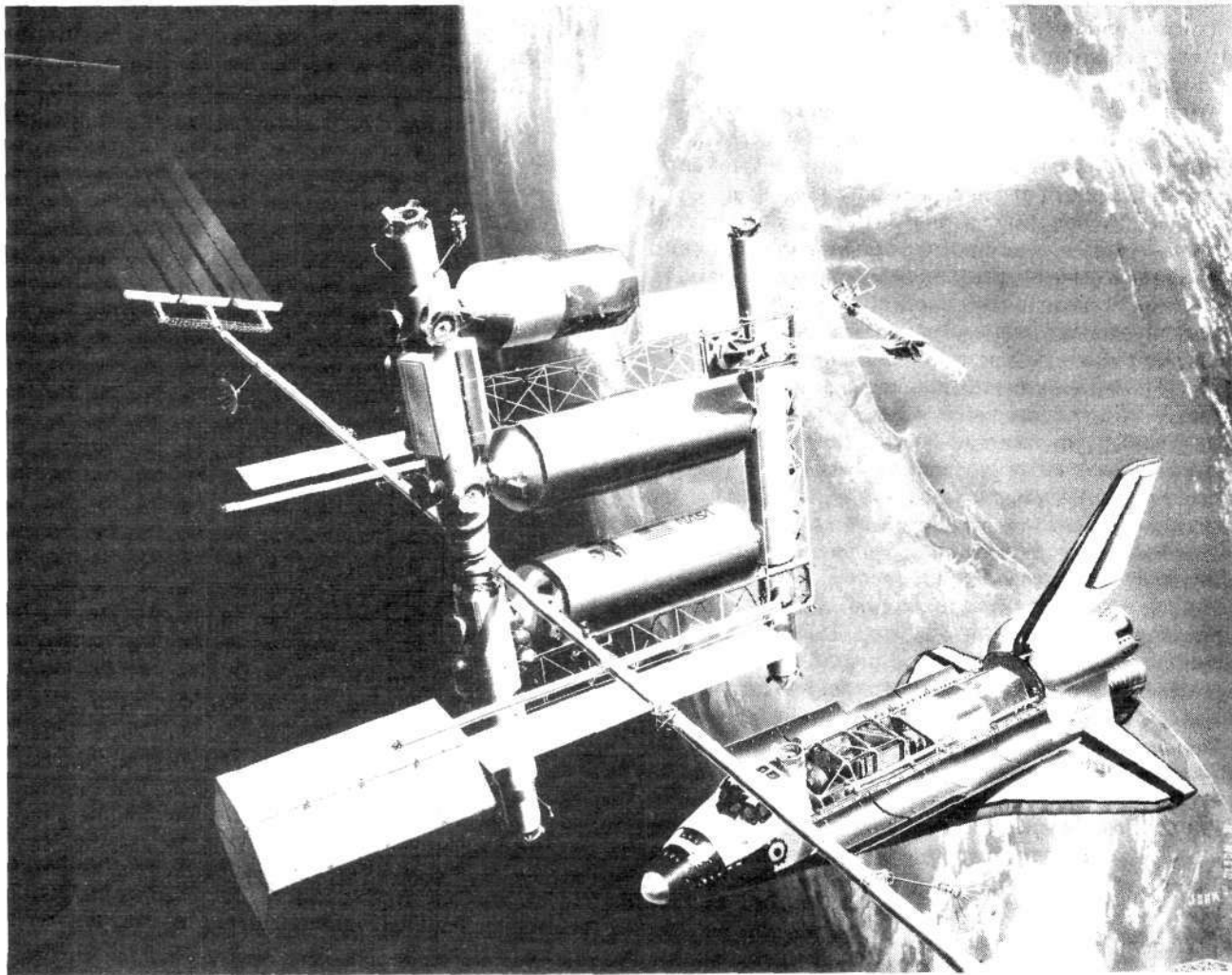
Mundial, como el transporte de carga y los viajes aéreos comerciales se hicieron posibles; lo suficientemente baratos como para generalizarse. Tal fue el resultado de las inversiones y la investigación en la ingeniería aereodinámica, que se concebía al principio como un proyecto casi totalmente militar. Hoy es inconmensurable el efecto que ha tenido en el ámbito civil.

Lo mismo sucede con la exploración y los viajes espaciales. El impulso inicial vino de los proyectos de investigación militar de la Segunda Guerra Mundial, primero en Alemania y luego en la Unión Soviética y los Estados Unidos. Al inicio, las miras de la investigación eran puramente militares: perfeccionar los proyectiles balísticos intercontinentales. Todavía no acabamos de cosechar los frutos de dichos esfuerzos, pero no se necesita mucha imaginación para ver que en los próximos 50 años los efectos de la exploración espacial y de la colonización del sistema solar, con todas sus consecuencias económicas y tecnológicas, dejarán pequeños a los proyectiles balísticos intercontinentales, artefactos

que de cualquier forma están a punto de volverse obsoletos.

La tercera analogía con la situación actual —y quizás la más apropiada— es la de la energía nuclear. La bomba atómica sigue siendo esencialmente militar; pero los medios empleados para generar electricidad a partir de la energía nuclear —la aplicación civil más importante de la fisión nuclear hoy día— también provinieron del campo militar. Lo que se buscaba era un sistema de propulsión para submarinos. La idea era producir un aparato compacto, que no requiriese de combustible por largo tiempo y capaz de mover un submarino.

No hay duda de que los frutos que el perfeccionamiento de esta técnica ha tenido en la vida civil es mucho mayor que los que tuvo en lo militar la propulsión nuclear. La posibilidad de producir energía limpia, barata y relativamente independiente de los recursos naturales a partir del átomo deja muy atrás cualesquier frutos que en lo militar haya dado ese adelanto. Ello se debe principalmente a la



Boeing Aerospace

Representación artística del empleo del transbordador espacial Columbia para la construcción de un "centro de operaciones espaciales". En la parte de atrás se ve la Tierra. Para instalar este centro operacional del sistema defensivo de las armas de rayos se necesitará un avance muy grande en la ingeniería espacial.

visión de los propios inventores. El almirante Rickover, quien fuera el director de la Armada Nuclear de los Estados Unidos, dirigió y organizó sus investigaciones en un programa común tanto militar como civil.

La situación presente es muy parecida. Tenemos a la mano todos los elementos para poner en pie un sistema militar capaz de acabar definitivamente con el terror de un holocausto nuclear, es decir, neutralizar de una vez y para siempre los lanzamientos intercontinentales de armas nucleares y restablecer el equilibrio entre la ofensa y la defensa. Las consecuencias militares son de importancia obvia; pero en los próximos 20 años la significación civil de las armas de rayos será mucho mayor que su papel militar.

Pero necesitamos la voluntad política para unir los elementos de que ya disponemos, primero en la forma de un prototipo militar y posteriormente en las aplicaciones industriales concomitantes.

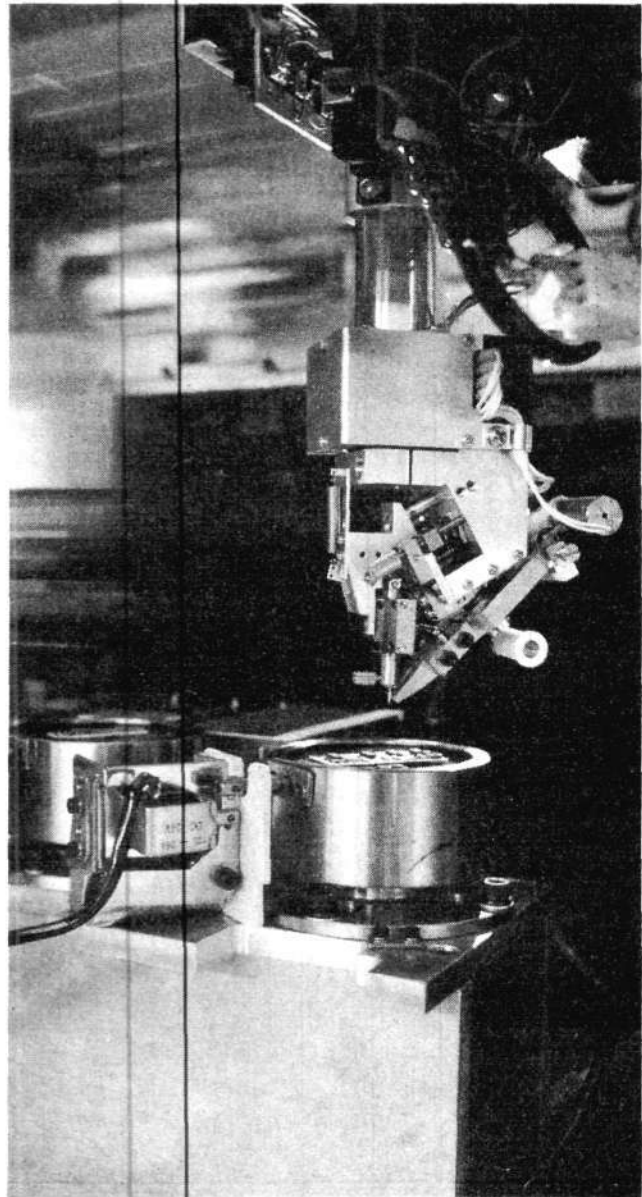
Lo que prometen las armas de rayos

La primera generación de armas de rayos, dado un serio esfuerzo ingenieril, se podría construir en cosa de tres a cinco años, inmediatamente después de lo cual se podría iniciar su emplazamiento en gran escala. Sin embargo, según todas las probabilidades, esa primera generación no se construirá jamás. La razón es que la primera generación de armas de rayos se basaría en una serie de técnicas ya existentes, que se superarán en el curso de esos mismos años.

Debido a su poca eficiencia y relativa tosquedad, el sistema más o menos convencional de defensa con armas de rayos —un gran espejo en órbita combinado con un gran láser químico estacionado en tierra— tendrá que ser reemplazado por una segunda generación de armas de rayos desde antes de que pueda entrar en servicio. Es decir, que dentro de cinco o siete años, una segunda y tercera generaciones de armas de rayos, basadas en mayores avances técnicos, harán a la primera generación de armas de rayos no imposible, sino obsoleta.

Los progresos técnicos e ingenieriles que puede traer consigo el perfeccionamiento de las armas de rayos son sorprendentes. La causa de ello radica en su *densidad energética*, que es siempre lo primero que hay que medir para aquilatar cualquier adelanto de la técnica. La capacidad de cualquier aparato o máquina para realizar trabajo se mide por la densidad energética que el aparato o máquina en cuestión es capaz de gobernar. Con el grado actual de avance de la técnica, tanto en sus aplicaciones militares convencionales —sin considerar las armas nucleares— como en las industriales, la densidad energética depende de la capacidad de aprovechar la energía de los enlaces químicos (por medio de la combustión de combustibles fósiles o la explosión de explosivos químicos, por ejemplo). Esta energía es comparable con la energía de ionización de un átomo.

La energía que se gobierna con la producción de rayos es entre cien y mil veces mayor. Esto se debe no sólo a que nos abre la puerta de la energía de fusión y de algunos procesos nucleares, sino también a que ese nuevo dominio de la técnica trata con la materia en su "cuarto" estado, el estado de plasma. En el estado de plasma, las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia son las que importan,

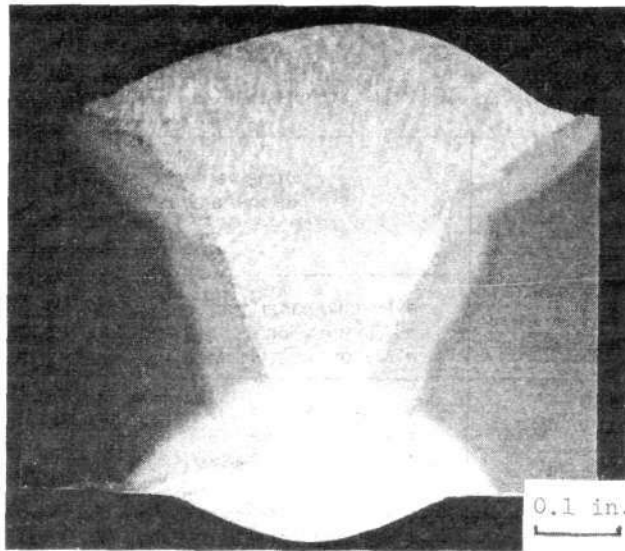


Nippon Electric Company

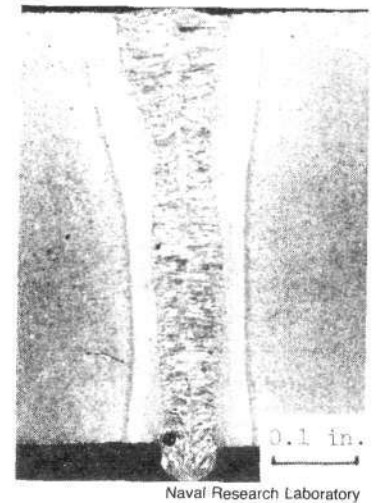
La compañía eléctrica japonesa Nippon ha diseñado el robot ARMS-D (siglas de su nombre en inglés), que es un robot con brazos y sensores ópticos para ensamblaje de precisión, ajuste e inspección de pequeños dispositivos de estado sólido. El uso de láseres como tecnología defensiva, así como en sus aplicaciones civiles, requerirá de amplias aplicaciones de estos dispositivos.

más que las químicas y las electrónicas. La densidad de la energía que ha de gobernarse crece unas mil veces.

No estamos ante una mera extrapolación de técnicas anteriores, sino ante la clave de toda una serie de interacciones físicas que por primera vez se podrán aprovechar en novedosas aplicaciones militares e industriales. Este hecho se indica más elocuentemente si se expresa desde el punto de vista de la energía por partícula activa. Con las técnicas convencionales, la energía promedio en un proceso químico muy energético es de aproximadamente 10 electrón-



La soldadura con láseres aumenta grandemente la productividad porque con éstas técnicas se evitan varios pasos intermedios. Aquí se muestran cortes transversales de soldaduras con técnicas convencionales (izquierda) y con láseres (derecha).



voltios. La energía de las partículas activas en un horno siderúrgico, por ejemplo, es de aproximadamente 10 electrón-voltios por partícula.

En cambio, con los plasmas, estamos hablando de 100.000 electrón-voltios por partícula. La energía por partícula que se genera con los plasmas es mil, diez mil o quizás cien mil veces mayor que con los medios convencionales. La concentración de tanta energía reduce espectacularmente el tiempo en el cual se pueden llevar a cabo las interacciones físicas. Toma menos tiempo fundir un material o transformar su estado físico, por ejemplo. En promedio, a estas densidades energéticas, el tiempo en el cual actualmente se llevan a cabo los trabajos industriales se puede reducir unas mil veces.

La ampliación de la parte del espectro electromagnético que se pone a nuestro servicio es otro aspecto de los tremendos avances que se pueden lograr con estas técnicas. Actualmente, la forma en la cual aplicamos la energía se limita casi por completo a una parte minúscula del espectro electromagnético, en la región del infrarrojo, debido a que en todos los casos, en el campo militar o en el industrial, la energía se aplica sobre todo en forma de calor. En la producción de acero, en la soldadura y el cortado de metales, en la elaboración de alimentos, el común denominador es la liberación de energía en forma de calor.

La tecnología de rayos y plasmas pone toda la gama del espectro electromagnético a nuestro servicio. La porción del espectro electromagnético a la que se tendrá acceso útil desde el punto de vista económico será unos cien millones de veces mayor que en lo presente: desde los rayos equis duros de 1 a 5 angstroms, hasta las microondas. De modo que la misma diferencia que hay entre un horno de microondas y uno común y corriente se podrá sentir en todos los aspectos de la vida humana.

Como resultado del aumento de la densidad energética, se reducirán considerablemente el tiempo de elaboración —como el horno de microondas reduce el tiempo de cocción— y la cantidad total de energía necesaria para realizar el mismo trabajo. En promedio, con esas densidades energéticas, las operaciones industriales se pueden acelerar mil

veces y la energía consumida reducirse cien veces. O sea que se aplica energía más intensa por un lapso más corto, lo que arroja un consumo total de energía menor.

Energía sin límites

El efecto más revolucionario de la producción de armas de rayos será el perfeccionamiento de una nueva fuente de energía: la energía de fusión nuclear. La primera o la segunda generación de armas de rayos nos dará del 70 al 80 por ciento de los componentes necesarios para construir la primera generación de reactores de fusión. A pesar de que hay importantes diferencias entre un cañón de rayos y un reactor de fusión, en general los conceptos de física básica necesarios para dominar las dos áreas se yuxtaponen notablemente.

El perfeccionamiento de las armas de rayos, con el dominio concomitante de la fusión nuclear, transformará totalmente la calidad de la vida humana sobre la Tierra. Si el día de mañana se le diera a la humanidad una fuente de energía limpia, ilimitada, relativamente barata y que proporcionara energía tanto en forma de electricidad como de calor para operaciones que exigen temperaturas elevadas, esto más que nada ayudaría a erradicar las causas de una posible guerra y de la inestabilidad internacional.

Es un hecho que actualmente los Estados Unidos conciben su seguridad nacional principalmente desde el punto de vista del acceso a la energía. Cualquiera que tenga la menor duda puede echarle una ojeada a las declaraciones recientes del Departamento de la Defensa de los Estados Unidos en que califica de cuestión de seguridad nacional el proteger el petróleo del Medio Oriente. Por supuesto que eso seguirá siendo motivo de preocupación nacional en tanto los Estados Unidos no cuenten con otra fuente barata y confiable de energía.

La aplicación industrial de láseres y otras técnicas derivadas de la producción de armas de rayos daría frutos tan valiosos como su auxilio en la producción de energía abundante, limpia y barata. El aspecto cualitativo decisivo es que se podrá emplear en la industria una gran variedad de nuevas formas de energía, y no simplemente energía calorífica:

Tabla 1
COMPARACION ENTRE LOS LASERES Y LAS TECNICAS CONVENCIONALES

	<u>Técnicas convencionales</u>		<u>Láseres</u>		<u>Otras ventajas de los láseres</u>
	Densidad de flujo energético	Tiempo	Densidad de flujo energético	Tiempo	
Cortado de metales	10 ⁷	1	5 × 10 ⁷	.2	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite cortar nuevos materiales ● Alta precisión ● Menor fatiga térmica
Soldadura	5 × 10 ⁶	1	5 × 10 ⁶	.1	<ul style="list-style-type: none"> ● Nuevas Soldaduras ● No necesita vacío ● Menor fatiga térmica
Tratamiento térmico	10 ²	1	1 × 10 ⁴	.05	<ul style="list-style-type: none"> ● Aleaciones de superficie ● Uniformidad

rayos equis y ultravioleta, haces de electrones y protones, toda la parte visible del espectro, etc.

La tabla adjunta resume las aplicaciones que tienen en la industria los rayos láser. La tabla se tomó de un artículo escrito por el jefe del programa soviético de láseres, E. P. Velijov, en abril de 1983 en *Economicheskaya Gazeta*, revista semipopular de economía. Velijov informa de los recientes adelantos de la aplicación de los rayos láser en la Unión Soviética en la producción de automóviles, acero y máquinas herramienta.

Hay tres campos de la industria en los se pueden utilizar rayos láser. En cada caso, reemplazan la energía calorífica con una forma de energía muy organizada y altamente estructurada. En dichas áreas, su aplicación ha permitido aumentar diez veces la densidad de flujo energético, y reducir unas diez veces el tiempo que toma realizar cada operación. En el caso del corte de metales, por ejemplo, si se incrementa cinco veces la densidad de potencia —la intensidad con la cual se aplica la energía— en operaciones que se hacían antes con sierras, sopletes u otras herramientas, el tiempo de corte se reduce cinco veces.

Además, con el aumento de la densidad de potencia es posible cortar materiales que anteriormente no se podían cortar. Con el láser, las cerámicas, los plásticos o el vidrio por ejemplo, se podrán cortar tan fácilmente como se corta el metal. También hay una tremenda mejoría en la exactitud con la que se hacen los cortes, pues la energía no se aplica en forma burda, sino de manera quirúrgica. Con los métodos convencionales, después de calentar el material se le aplica todavía más energía para hacer el corte, lo cual reduce la exactitud del mismo, además de imponer esfuerzos térmicos al material, con todos los problemas que de ello se derivan. El láser, debido a que puede concentrar energía a intensidades muy elevadas, evita esta clase de problemas, por lo que no sólo supera las técnicas actuales, sino que también abre nuevas posibilidades que no existían antes.

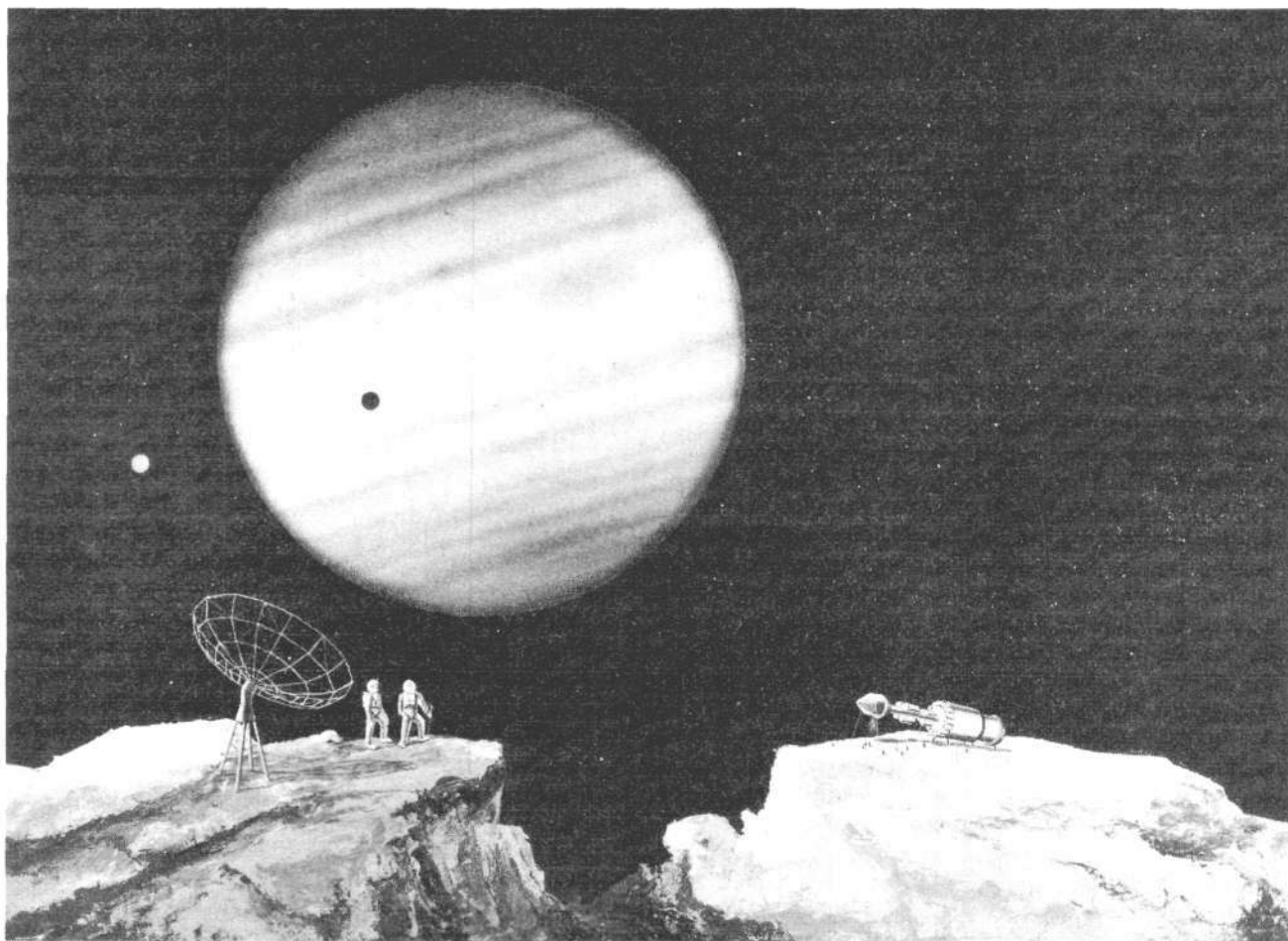
Lo mismo sucede con la soldadura. Con aumentar diez veces la densidad energética, el tiempo que toma cada operación se reduce diez veces; se pueden unir materiales que antes era imposible; y, por supuesto, las costuras son mu-

cho más resistentes. La experiencia soviética indica que los problemas de mantenimiento de las juntas soldadas se corrigen en un 70 por ciento cuando se suelda por medio de láseres en vez de arcos eléctricos u otros métodos convencionales, debido a que las costuras son más duraderas porque contienen menos puntos de tensión.

Sin embargo, lo más sorprendente es el tremendo progreso del tratamiento térmico. Esta es un área en la cual el láser revoluciona totalmente la aplicación de energía, que hoy consiste esencialmente en el empleo de la banda del infrarrojo. La parte más importante de un tratamiento térmico es proporcionar un acabado de superficie; es decir, darle la dureza necesaria a la superficie del metal. Por ejemplo, en un motor, para hacer que los cilindros sean resistentes al uso, es necesario someter a todo el bloque del motor a tratamiento térmico. Con los láseres es posible producir aleaciones superficiales mientras se hace el tratamiento térmico. No sólo se utiliza mucho menos energía, sino que es posible dar a las superficies metálicas cualesquier acabados y composiciones, según convenga. Digamos que se puede construir un bloque de motor enteramente de aluminio, con la parte interna de sus cilindros tratada con este método de aleación para que dure varios cientos de miles de kilómetros.

El Instituto de Tecnología de Illinois —que dedica especial atención a la aplicación industrial de los láseres, solos y en combinación con autómatas— informa que el tratamiento térmico de grandes engranes con rayos láser toma sólo unos minutos, mientras que con los métodos comunes puede tomar todo un día. El costo se reduce de un dólar a 20 centavos. De hecho, los láseres pueden hacer el engrane casi de principio a fin, guiados por computadoras capaces de regular sus movimientos, la intensidad de sus pulsos de energía, etc.

En la industria química y bioquímica, los láseres tienen incontables aplicaciones: separación de isótopos, purificación de materiales, elaboración de productos bioquímicos (como vitamina D, antibióticos, triptófano), modificación química de superficies, pirólisis, etc. La utilización de rayos láser para separar isótopos podría revolucionar los



La revolución industrial de los láseres para asegurar la conquista del espacio confirmará una vez más la naturaleza fundamental de los seres humanos: el hombre como ingeniero, no como fuerza muscular, el ser humano capaz de utilizar su mente para entender y cambiar las leyes del universo.

métodos de enriquecimiento de uranio y abaratar drásticamente el combustible de los reactores de fisión.

Láseres y alimentos

Esas y otras muchas aplicaciones industriales son quizás las que cualquiera podría esperar. Sin embargo, hay otra rama industrial más, de importancia gigantesca, en la que los láseres pueden traer una revolución: *la elaboración de alimentos.*

Los seres humanos consumen menos de la mitad de los alimentos que producen. La razón es que cerca del 40 por ciento de total de alimentos producidos se descompone muchos antes de que pueda llegar a la mesa del consumidor. Los láseres podrían revolucionar completamente la industria de los alimentos, al punto en que podríamos resolver casi de inmediato la crisis alimentaria que padece el mundo actualmente.

En el caso de la proteína animal, por ejemplo, el problema no es que no se produzca suficiente, sino que se echa a perder antes de que se consuma, o que los países que más la necesitan no tienen la infraestructura necesaria para conservarla; lo más importante, les falta la refrigeración necesaria. Con láseres se puede hacer la misma clase de inter-

vención quirúrgica que en el trabajo de metalistería, para detener los procesos bioquímicos que destruyen los alimentos.

La leche, por ejemplo, actualmente la pasteurizamos; la calentamos con energía infrarroja para purificarla. Esto sirve por un lapso muy corto, y, aun refrigerada, la leche no dura más de dos semanas o a lo sumo un mes. Si en vez de pasteurizarla tratásemos la leche con luz ultravioleta en forma adecuada, se podría mantener a temperatura ambiente por tres años sin descomponerse.

Es difícil subestimar las bondades del empleo de rayos en la conservación de alimentos. La refrigeración no será necesaria. El gran volumen de excedentes de productos avícolas que hay en el sector avanzado se podrá enviar al sector subdesarrollado sin temor al problema de la refrigeración. Los pollos, por ejemplo, una de las fuentes de proteína animal más baratas, requieren solamente que se los ponga en una bolsa de plástico al vacío y luego se los irradie con un haz de electrones, para permanecer frescos sin refrigeración por todo el tiempo que la bolsa permanezca cerrada. Se puede hacer exactamente lo mismo con el trigo: ponerlo en una bolsa e irradiarlo; no se descompondrá mientras no se humedezca.

Si se contara con fuentes de radiación ultravioleta o de haces de electrones baratas y confiables se cambiaría radicalmente la disponibilidad de alimentos en el mundo.

Revolución científica

Las consecuencias del trabajo científico y técnico necesario para producir armas de rayos no se limitan a las aplicaciones industriales enunciadas hasta aquí. Al mismo tiempo, implican la posibilidad de una genuina revolución científica, la exigencia y la oportunidad de acrecer nuestro dominio científico del universo.

Esto tampoco es excepcional. A lo largo de la historia, en muchas ocasiones han ocurrido avances técnicos cuyo fundamento científico estaba por entero fuera del dominio de los científicos e ingenieros de la época. Tal fue el caso de la máquina de vapor, o el descubrimiento de los rayos equis hace 100 años. A pesar que no se conocían perfectamente los principios científicos que gobernaban dichos descubrimientos, esto no impidió que su aplicación industrial se generalizase casi inmediatamente. Lo mismo ocurre actualmente con los plasmas y los rayos. Todavía falta descubrir los fundamentos científicos de estos fenómenos; sin embargo, sus aplicaciones prácticas son ya formidables.

Los rayos láser, por ejemplo, todavía no se sabe realmente cómo se generan. Tampoco se conocen a profundidad los fundamentos de los láseres de rayos equis o de otros rayos de partículas. Existen procesos físicos que amplifican la energía, dándole una estructura coherente, pero los científicos no le encuentran explicación. El más impresionante de todos esos procesos es el que ocurre en la generación de rayos de partículas en, en el que éstas parece que se autoaceleran y son capaces de concentrar y organizar la energía desorganizada con que se alimenta el rayo. Los generadores de rayos organizan la energía en pulsos de partículas de energía muy intensa y elevada, mediante mecanismos físicos que los físicos de hoy no entienden todavía. Cuando logremos desentrañar esa propiedad de autororganización de los plasmas, entenderemos las interacciones fundamentales que ocurren en las estrellas, en los procesos de muy elevada energía como los que se observan en los cuasares y en otros objetos astronómicos más exóticos.

La física moderna no se explica aún los principios en los que se basa la propagación de estos rayos. Muchos que critican el programa de las armas de rayos argumentan que los rayos de partículas láser no se pueden propagar a través de la atmósfera o a través de los campos magnéticos que rodean a la Tierra. Sin embargo, estos rayos se han propagado no sólo en los experimentos, sino desde siempre en la naturaleza. Las teorías de esos críticos probarían también que los rayos de electrones que emite el Sol no podrían llegar a más de cinco kilómetros de su superficie; sin embargo, se sabe que los rayos de electrones que emite el Sol llegan diariamente cuando menos a la órbita de Jupiter (es decir, a millones de kilómetros de distancia).

El fenómeno se rige por una serie de interacciones físicas que no se entienden aún. Así pues, como quinta o sexta generación de armas de rayos, el futuro de los rayos de partículas es prometedor, pero es también evidente que nos estamos enfrentando a ciertas interacciones físicas básicas que la física actual no puede explicar.

Lo mismo sucede en la propagación de los rayos láser. Se asegura que los rayos láser no se propagan a través de la atmósfera. En general, esto es cierto (y tiene sus ventajas, ya que la atmósfera proporciona una defensa natural). Sin embargo, es indudable que las futuras generaciones de rayos láser se podrán propagar a través de la atmósfera; lo hacen mediante un proceso de autoenfoco y de modificación de la atmósfera, por lo que en un sentido muy real se puede decir que el rayo láser crea las condiciones que necesita para propagarse. Es un mecanismo físico de transparencia inducida por el rayo láser en un medio opaco.

Es decir, por medio de una serie de estructuras de alta densidad energética que el mismo rayo láser crea, se establece un mecanismo de transmisión en el cual el frente del rayo modifica el estado de la materia del medio por el cual se difunde, de tal manera que el resto del pulso se puede propagar a través del medio. La energía cedida al medio por el frente del pulso del rayo es recogida por la parte trasera del pulso. Este intercambio de energía entre el medio y el pulso del rayo significa que el rayo láser se puede propagar en un medio que para un rayo de luz ordinario parece opaco.

Finalmente, la física de la intracción entre el arma de rayos y su blanco, abre las puertas al estudio de una serie de estados de la materia hasta ahora no estudiados, como los que se crean cuando la formación de una onda de choque produce densidades muy elevadas de materia y energía. Esta es un área novedosísima de la física, en la que hay multitud de cosas por entender. A pesar de que su aplicación práctica está casi al alcance de la mano, apenas si se ha tocado los principios científicos que han de explicar el fenómeno.

Las aplicaciones prácticas de plasmas y rayos, más los nuevos campos que abren a la ciencia, demuestran claramente la gran importancia de las armas de rayos. No es simplemente que nos den una solución al problema de la guerra nuclear, por más que eso es importantísimo. Tampoco se limita al hecho de que nos da la capacidad de resolver problemas materiales acuciantes y de sostener en nuestro planeta a ocho mil o diez mil millones de habitantes a niveles de vida dignos de verdaderos seres humanos. La tecnología de las armas de rayos hará más que eso: iniciará lo que podemos llamar la tercera revolución industrial, el principio de la Era del Plasma. Será un avance cualitativo, la aceleración del dominio del hombre sobre la naturaleza, que nos dará acceso a las fuerzas fundamentales del universo físico para empezar a ponerlas al servicio de la humanidad.

Ciertamente que los resultados que de esto se deriven son importantes tanto en lo civil como en lo militar. Pero lo que es todavía más importante, esos resultados confirmarán una vez más la naturaleza fundamental de los seres humanos: el hombre como ingeniero, no como animal, no como fuente de fuerza muscular, no como obrero o campesino, sino como el amo del universo, capaz de utilizar su mente para entender y cambiar las leyes del universo. Dicha actividad devendrá una necesidad práctica diaria en la Era del Plasma, y la verdadera promesa de las armas de rayos es que son el primer paso en esa dirección, la llave para abrir el cerrojo de esa puerta.

El abecé de la física de plasmas desde un punto de vista avanzado

Steven Bardwell

El estado plasmático ionizado del combustible caliente de un reactor de fusión nuclear es el estado más complejo e intrigante de la materia inerte conocido hasta hoy.

Dos experimentos cruciales sobre plasmas realizados en los últimos diez años han alterado en una forma fundamental las ideas comúnmente aceptadas en la física. Estos experimentos demuestran que el plasma tiene una tendencia inconfundible a progresar desde un estado inicialmente desordenado hacia estados finales altamente ordenados y globalmente coherentes; y estos estados adquieren tal densidad energética que producen espontáneamente una reacción de fusión.

La implicación de este comportamiento altamente no lineal del plasma es que la evolución de todo sistema físico está gobernada por un conjunto de leyes autocambiantes, una especie de causalidad no determinística que guarda una marcada semejanza con la evolución biológica y social.

En los próximos años, el desarrollo de la energía de fusión nuclear creará una coyuntura extraordinaria. Coexistirán, casi juntos, estados de la materia que nunca hubo antes en el universo. En el interior de un reactor de fusión, el combustible de hidrógeno pesado alcanzará temperaturas superiores a las de las estrellas más calientes, y a pocos centímetros de este combustible, a una temperatura cercana al cero absoluto (-260°C , más o menos), una bobina magnética superenfriada conducirá electricidad prácticamente sin resistencia alguna; a una temperatura media entre estos fantásticos extremos, el hombre vigilará todo este proceso de su propia creación.

Ninguno de estos tres extraordinarios estados de la materia existió en lo que conocemos del universo antes de que apareciera el hombre; para entender cada uno de ellos, sin embargo, se requiere un mismo enfoque científico. El plasma de fusión, el metal superconductor, y sobre todo el hombre, evolucionan de una manera autoorganizada, avanzando naturalmente de estados caóticos iniciales a estados de orden y estructura continuamente superiores.

Parece extraño que la necesidad de adquirir conocimiento práctico de la superconductividad y de la física de plasmas se presente justamente cuando la continuación del progreso autoordenado y el desarrollo de la humanidad dependen, para no extinguirse, de que el hombre domine la energía de fusión. Por este motivo, la física de

NOTA DEL EDITOR:

Este artículo fue escrito para darle al lego una explicación sencilla, sin caer en lo trivial, de algo que suele preguntarse a menudo: ¿Qué es la física de plasmas? Aunque el material es elemental desde el punto de visto físico, desde el punto de vista científico-conceptual es muy avanzado.



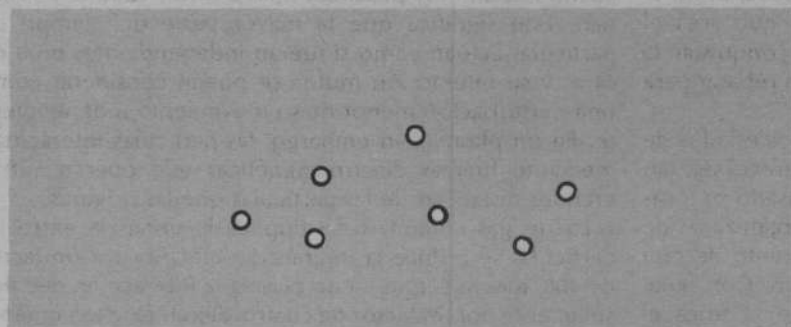
Figura 1
REPRESENTACION SIMPLIFICADA
DE UN PLASMA

Un estado plasmático, según la idea prevaiente, es una colección de partículas cargadas en un estado gaseoso. La mayoría de los gases que conocemos en la vida diaria están compuestos de átomos neutros o moléculas que interactúan entre sí a temperaturas y densidades normales solamente a través de fuerzas débiles y de corto alcance. En cierto sentido, sólo "saben" de la existencia de otras partículas cuando chocan con ellas.

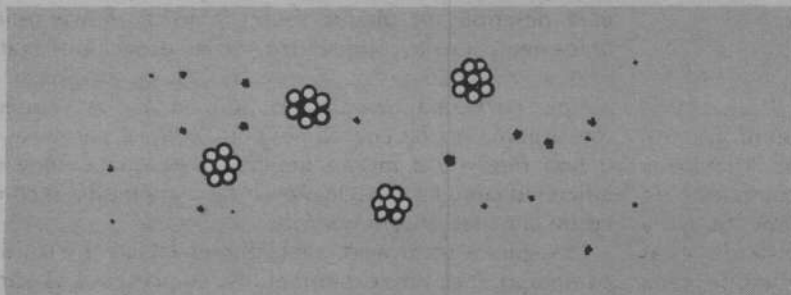
A medida que se calienta un gas neutro, estas colisiones se hacen más frecuentes y violentas, desprendiéndose con ello los electrones de los átomos o moléculas, y, si la temperatura es suficiente, estas colisiones impiden cualquier asociación estable y neutra de los electrones con sus núcleos correspondientes. El gas se vuelve entonces una colección de partículas, electrones y núcleos, cargadas eléctricamente.

Las partículas del plasma, sin embargo, interactúan intensamente a través de fuerzas magnéticas y electrostáticas, que son fuertes y de largo alcance. La fuerza electrostática es atractiva entre núcleos y electrones, y repulsiva entre partículas del mismo signo. Así, pues, todas las partículas del plasma se influyen fuertemente entre sí, y sus movimientos responden a los campos generados por cada una.

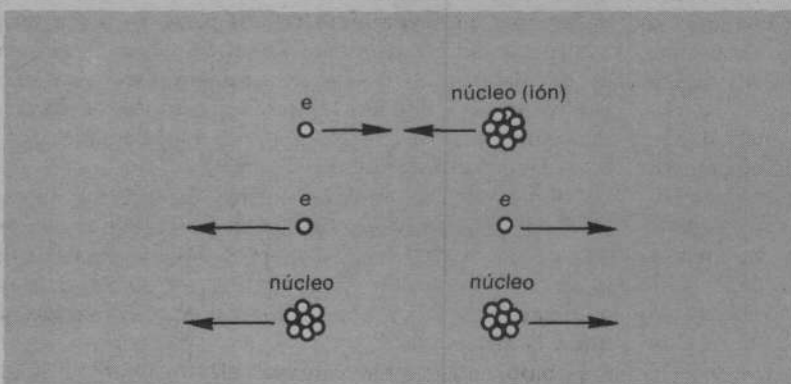
Las fuerzas magnéticas entre partículas cargadas son algo más complicadas; sólo se dan cuando las partículas están en movimiento. Una partícula cargada en movimiento crea una fuerza magnética perpendicular a la dirección en que se mueve, como se ve en (d). Una partícula cargada que se mueve en un campo magnético externo se desplaza en sentido perpendicular al de su movimiento propio. En el caso más sencillo, esto deviene en el movimiento en espiral de una partícula que atraviesa un campo magnético rectilíneo, cuyas líneas de fuerza (designadas **B** en el diagrama) constituyen un eje sobre el cual gira y se desplaza.



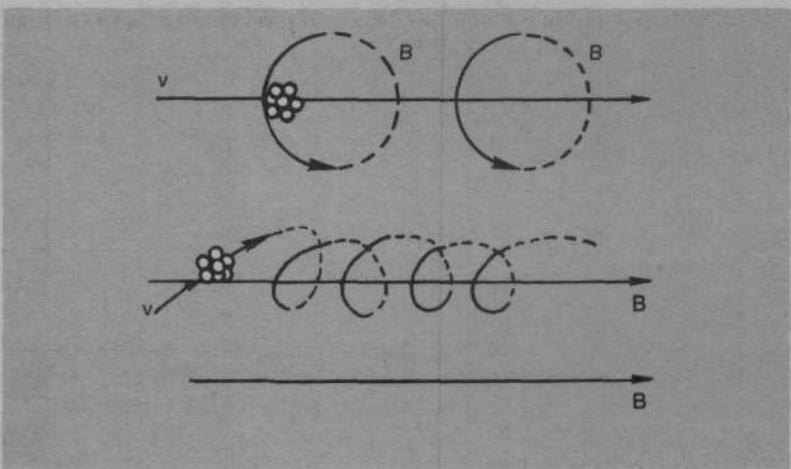
(a) Un gas neutro



(b) Representación general de un plasma



(c) Fuerzas electrostáticas



(d) Fuerzas magnéticas

plasmas no sólo abre las puertas a una revolución en la base técnica de la sociedad humana, sino que crea el ámbito experimental más accesible donde conquistar la nueva frontera de la ciencia que es necesario rebasar para que sea posible ese salto tecnológico.

Un plasma es el más intrigante de todos los estados de la materia, precisamente debido a que parece ser tan simple. Los científicos del siglo XX han excusado su incapacidad de describir las características autoorganizadas de los metales superconductores con el argumento de que la superconductividad es un efecto cuántico. Con igual esmero, han puesto fuera del dominio de la física el estudio de los sistemas vivientes. No obstante, debería ser posible describir a fondo un plasma desde el punto de vista de la física clásica.

¿Qué es un plasma?

Según su descripción convencional, un plasma es el estado de la materia que resulta de la infusión de grandes cantidades de energía en cualquier sustancia. Primero la sustancia se convierte en un gas ordinario, compuesto de átomos o moléculas que se mueven caóticamente. En la medida en que aumenta la energía suministrada, estas moléculas se descomponen en átomos. Las colisiones cada vez más violentas entre los átomos hacen que se separen los electrones de los núcleos, y se forma una mezcla altamente energética de electrones y núcleos que se mueven independientemente unos de otros. Una llama, una luz de neón y una chispa son ejemplos de plasmas de baja energía.

Si un plasma fuese realmente como la mezcla aquí descrita, su comportamiento debería ser comprensible dentro del marco de la física clásica, ya que las partículas se influyen mutuamente mediante interacciones electromagnéticas que se conforman a la mecánica newtoniana. Debería ser más fácil todavía encontrarle explicación puesto que, según la mecánica estadística clásica, la alta energía de las partículas hace que el plasma alcance un estado final de desorden en equilibrio. Los campos eléctricos y magnéticos producidos por el plasma, y los movimientos de éste producidos por aquellos deberían bastar para dar cuenta sin dificultad de todo lo que ocurre en el plasma a escala macroscópica.

Sin embargo, esta explicación simple no funciona. La física de plasmas es el principal desafío de la física contemporánea precisamente porque el plasma se comporta anormalmente, esto es, en contra de las predicciones clásicas reduccionistas. La mayoría de los físicos, sin embargo, ha evitado hacerle frente a este desafío fundamental. Aunque ningún científico con uso de la vista puede negar el comportamiento poco común del plasma, los físicos generalmente elaboran explicaciones de este comportamiento que, aunque en ciertos aspectos contienen observaciones importantes sobre el carácter único del plasma, tienen como objetivo simplemente salir del apuro. Estas son algunas de dichas explicaciones:

La primera sostiene que las fuerzas que ligan a las partículas en el plasma son de largo alcance. En un gas inerte ordinario, las partículas solamente interactúan

cuando están muy próximas unas a otras; cuando colisionan. Esto significa que la mayor parte del tiempo las partículas actúan como si fueran independientes unas de otras y su interacción mutua se puede considerar como una perturbación menor de su movimiento independiente. En un plasma, sin embargo, las partículas interactúan mediante fuerzas electromagnéticas que operan aún a grandes distancias de las partículas que las originan.

En un gas común, si se duplica la distancia entre las partículas se reduce la interacción efectiva por un factor de 100, mientras que en un plasma la interacción decrece solamente por un factor de cuatro. Según el razonamiento convencional, esto significa que las partículas están fuertemente acopladas, y la dificultad que experimentamos para describir un plasma según la física clásica reside únicamente en la complejidad de las ecuaciones matemáticas empleadas. En un gas normal, las partículas se pueden considerar una por una, pero en un plasma, según este argumento, las ecuaciones para todas las partículas se deben resolver al mismo tiempo, tarea que excede en dificultad tanto las capacidades de las computadoras como las de la matemática moderna.

La segunda justificación de la discrepancia entre la física contemporánea y los experimentos con plasmas está estrechamente vinculada a la primera. En las situaciones que usualmente encontramos en la física, las fuerzas que determinan el movimiento de una partícula son externas a la partícula. El movimiento de un satélite y la trayectoria de un electrón en un campo magnético son situaciones corrientes en las cuales la fuerza que mueve la partícula proviene de otro cuerpo que no está afectado por el movimiento del satélite o del electrón.

Por ejemplo, un satélite terrestre no influye para nada en el sol, ni sufre alteración alguna el imán de un acelerador de partículas a consecuencia del movimiento que induce en el electrón. En un plasma, sin embargo, lo que se mueve y la fuente de las fuerzas que lo mueven son una y la misma cosa.

Debido a que están cargadas eléctricamente, las partículas de un plasma funcionan como fuentes de campos eléctricos y magnéticos que influyen sobre otras partículas que se encuentran a su alrededor. A su vez, estas partículas alteran el movimiento de las primeras, y así sucesivamente. Desde el punto de vista de la física teórica contemporánea, el resultado es un conjunto de ecuaciones no lineales en las cuales el movimiento de las fuentes de los campos se debe a los campos creados por esas mismas fuentes. De nuevo, el razonamiento convencional es que la física de plasmas es incapaz de describir lo que hace el plasma debido a que estas ecuaciones son demasiado complicadas. Las leyes ya se conocen, argumentan; el problema es que actualmente no podemos deducir las consecuencias de estas leyes.

El tercer argumento es que esta misma situación ha surgido antes en la física, pero los físicos siempre han logrado entender el problema en forma aproximada, gracias a que los llamados efectos no lineales eran lo suficientemente diminutos para considerarlos como pequeñas perturbaciones de las propiedades lineales del sistema en

general. Según este argumento, ambas propiedades del sistema (fuerzas de largo alcance y campos autogenerados) dan origen al llamado comportamiento colectivo, y en la medida en que este comportamiento colectivo no sea demasiado fuerte, se le puede describir desde el punto de vista de que es una especie de coincidencia complicada del movimiento de partículas individuales.

En un plasma, sin embargo, ni siquiera este truco funciona. El plasma es demasiado alineal; en él domina por completo el comportamiento colectivo. Hay solamente unos cuantos plasmas (los menos interesantes), generalmente fríos y poco densos, que se comportan como si fueran colecciones de partículas independientes. Todos los plasmas importantes, especialmente aquellos utilizados en el estudio de la fusión, tienen propiedades increíblemente complejas, la mayoría de las cuales no se han descrito todavía, mucho menos explicado.

Las fuerzas de largo alcance, los campos autogenerados, y los efectos colectivos son todos rasgos del plasma cuya importancia es capital, pero la lección que se deriva de ello es aún más importante: *la física contemporánea es fundamentalmente inadecuada para describir un plasma, y de hecho, es fundamentalmente inadecuada para describir el universo como un todo.*

Cualquier conjunto de leyes fijas es en principio insuficiente para describir un universo que evoluciona. Al sorprendente comportamiento autoorganizado de un plasma no se le pueden dar explicaciones evasivas como los tales efectos colectivos y coherentes. Estas extraordinarias características son importantes en cuanto constituyen indicaciones de que el universo inorgánico comparte las cualidades creativas características de la evolución humana. No debe extrañarnos que la física contemporánea sea incapaz de darle explicación a fenómenos que se parecen a la vida, ya que ha excluido la vida explícitamente de su dominio teórico. El problema está en que *todo* se parece a la vida.

¿Cómo funciona un plasma?

Para investigar los fenómenos del plasma se debe partir de un claro propósito de dominar las implicaciones de una coherencia universal en transformación perpetua, guardando a la vez un escepticismo saludable respecto del estado actual de la física. No obstante, una vez determinado el curso de la investigación, la física clásica puede proveer indicaciones de los procesos implicados, y nos vemos sin más alternativa que emplear las herramientas de los mejores físicos y matemáticos que, como Bernhard Riemann, sí entendieron esta paradoja.

Debe quedar muy claro cuál es el objeto de estas investigaciones físico-matemáticas. La ciencia de la investigación está en formular una hipótesis sobre el proceso global de desarrollo que experimenta un determinado sistema. La física y la matemática pueden entonces servir para esclarecer cada etapa de esta evolución, aguzando y verificando a cada paso la hipótesis inicial. En un sentido fundamental, la física y la matemática como las conocemos en la actualidad son incapaces de aproximarse siquiera al proceso evolucionario en sí. A lo sumo identifican las

huellas de la bestia, pero la presa siempre se les escapa. Un verdadero científico, sin embargo, nunca se contentaría con un mero rastro.

La ciencia de la física de plasmas, desde un punto de vista avanzado, consiste en aplicar el instrumental de la física y de la matemática al comportamiento de un plasma con el fin de determinar el proceso real de evolución autoorganizada del cual el plasma es una expresión experimentalmente accesible.

Hay dos experimentos arquetipo en la física de plasmas que son cruciales en la historia de la ciencia. Estos dos experimentos —la propagación de un haz de electrones a través de un plasma y la propagación de un plasma a través de un campo magnético débil— hacen ineludible para todo el que aún no lo sepa que el universo está gobernado por un proceso coherente de evolución.

Y, lo que es más importante aún, estos experimentos proveen datos empíricos decisivos sobre cómo ocurre realmente dicha evolución.

Caso de estudio número 1: haz de electrones sobre un plasma

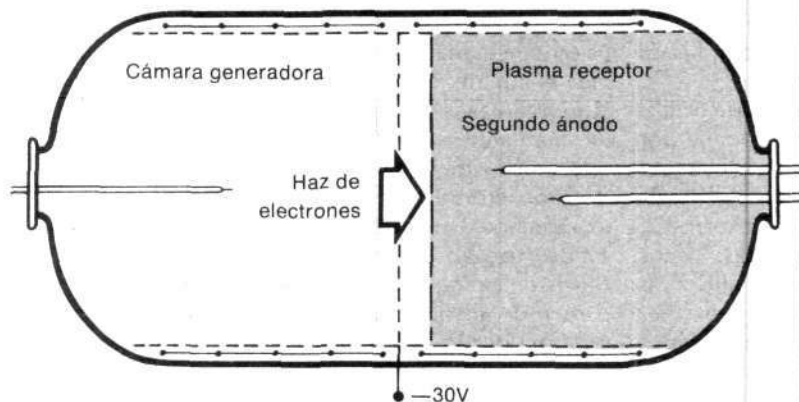
En 1974, A. Wong y B. Quon, de la Universidad de California, realizaron uno de los más simples y sorprendentes experimentos de la física de plasmas. Aunque un buen número de físicos había anticipado en teoría sus resultados, este experimento inició un profundo proceso de reevaluación de la idoneidad de la física de plasmas.

El aparato experimental es muy simple. Wong y Quon hicieron incidir un haz de electrones de alta intensidad, con una velocidad de 0.002 veces la velocidad de la luz, sobre un plasma uniforme no magnetizado. Un experimento equivalente, usando materia que no está eléctricamente cargada, sería inyectar un chorro de agua en un gran recipiente lleno de agua. Como lo ilustra la figura 2, el resultado obvio del experimento con el agua es que el flujo se pierde en turbulencia después de haber penetrado un poco en el agua. Este resultado parece ser tan claro que difícilmente merece el experimento.

No obstante, un examen meticuloso del experimento con el flujo de agua evidencia resultados que se deben tener en cuenta antes de pasar al caso del plasma. El primer efecto de inyectar energía ordenada al recipiente de agua es la formación de un gran vórtice casi perfecto cuya sección transversal se puede apreciar en la fotografía. A medida que penetra en el agua, esta estructura única se descompone en una multitud de remolinos cada vez más pequeños, hasta que el movimiento visible se disipa por completo.

Se han tomado incluso medidas muy cuidadosas que muestran que la energía del flujo de agua se transforma en *calor* (movimientos microscópicos desordenados del agua) y que el movimiento inicial se hace cada vez más pequeño y desordenado. En otros experimentos se han cuantificado estas dos observaciones, y se ha demostrado, primero, que la viscosidad (la resistencia del agua a las diferencias de velocidad de flujo, o la fricción del agua) hace que la turbulencia disminuya gradualmente según una ley específica que es igualmente aplicable a experi-

(a) Experimento llevado a cabo por Wong y Quon con un plasma y un haz de electrones.



(b) Resultados del mismo experimento en un medio neutro (agua).

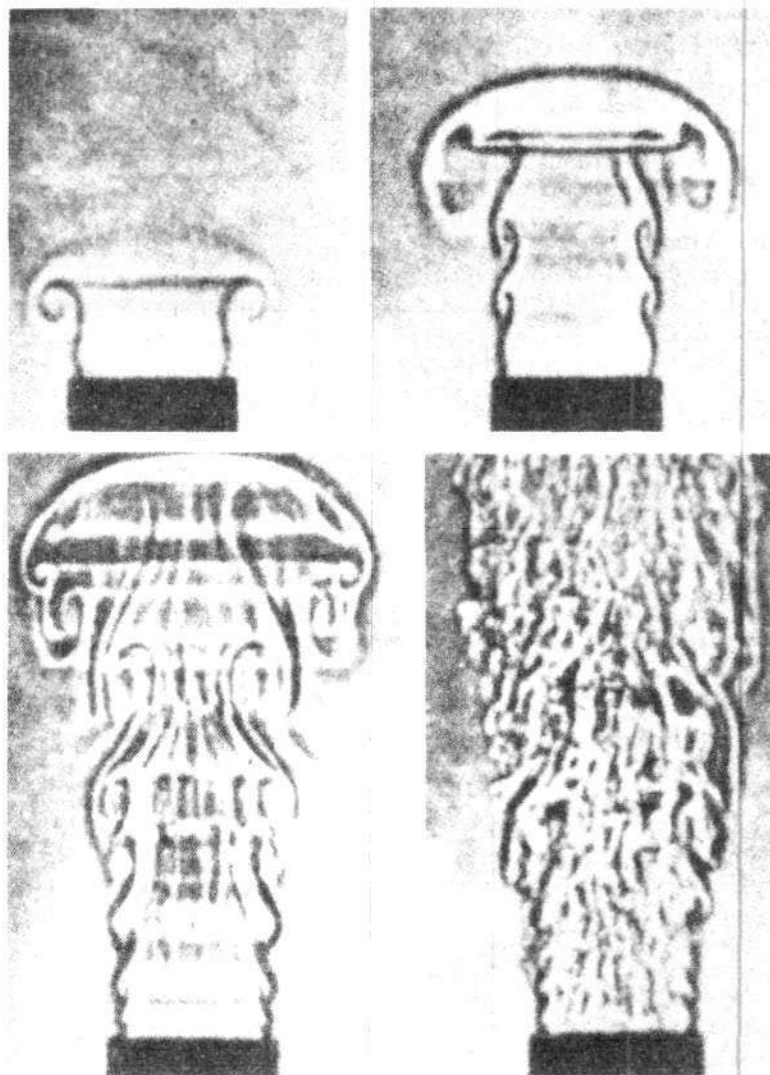


Figura 2
COMPARACION DE EXPERIMENTOS
DE PLASMA Y FLUJOS DE AGUA

Algunas de las más importantes e inequívocas muestras de las propiedades evolutivas de un plasma provienen de una serie de experimentos, muy sencillos conceptualmente, llevados a cabo por A. Wong y B. Quon en 1973 y en 1974, en los laboratorios de la Universidad de California. El diagrama muestra en forma esquemática el aparato experimental que utilizaron. El experimento consiste en disparar sobre un plasma un haz de electrones que viaja a 0.002 veces la velocidad de la luz. El tamaño total del plasma utilizado era de 1.5 m.

En la secuencia fotográfica se puede apreciar el mismo experimento para el caso de un fluido sin carga eléctrica. Un flujo de agua, que en las fotografías asciende verticalmente, penetra en un estanque lleno de agua. El tiempo transcurre de izquierda a derecha, y se ve que los grandes vórtices producidos inicialmente por la entrada del flujo se descomponen rápidamente en turbulencia cada vez más difusa.

Según la teoría común de la termodinámica (como se manifiesta en la segunda ley de la termodinámica sobre el aumento de la entropía), la inyección de energía ordenada dentro de un sistema resultará en el eventual calentamiento del mismo gracias a la disipación y al desorden progresivos de la energía en su interior.

Los experimentos que aquí se exponen —la inyección de un haz de electrones en un plasma (a) y de un flujo de agua en un cuerpo de agua en reposo (b)— ponen a prueba tal idea. En un fluido como el agua, la sencillez del medio resulta en la evolución aparentemente entrópica del sistema. En el caso de un plasma, sin embargo, sucede algo muy diferente, como se detalla en el artículo.

Figura 3
DOS CONCEPTOS ESENCIALES DE LA EVOLUCION FISICA

Los dos conceptos que se describen aquí, el de la cascada de energía y el de aleatoriedad de fase, son indicaciones importantes de las cualidades evolutivas de un sistema físico determinado. Ambos conceptos se pueden analizar en términos de la mecánica de continuos, ya que tanto los plasmas como los fluidos tienen un sinnúmero de propiedades que se le podrían atribuir a un medio continuo. Las ideas de cascada de energía y aleatoriedad de fase son importantes principalmente porque delimitan la continuidad del sistema.

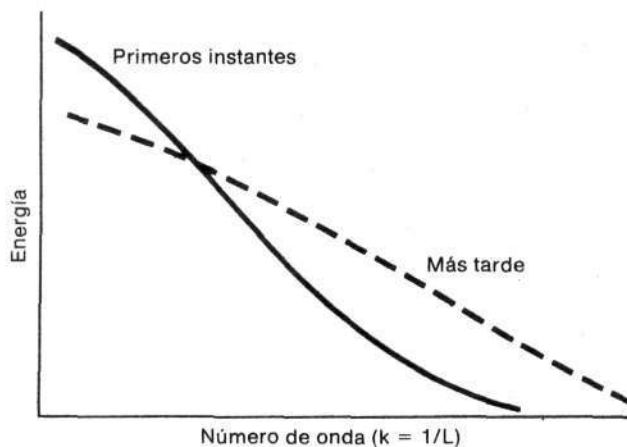
El espectro de un sistema es la correlación entre su energía y la longitud de escala característica de dicha energía. En la primera gráfica se hace relación entre la energía y el inverso de su longitud de escala, que se conoce como el número de onda, k . La longitud de escala corresponde a la longitud de onda de cualquier modo de oscilación que contenga energía, como el tono fundamental de una cuerda de piano, con todos sus hipertonos. El espectro de una cuerda de piano consistiría en una serie de picos ubicados sobre el tono fundamental (que sería el más grande) y sus tonos armónicos. La longitud de escala característica (cuyo inverso es el número de onda característico) del movimiento fluido ilustrado en la figura 2 es sencillamente el diámetro del primer anillo vorticial. A medida que se hace más caótico el movimiento, la longitud característica se reduce a un promedio conveniente de los diámetros de los distintos remolinos cada vez más pequeños de los cuales se compone la totalidad de la turbulencia.

El concepto de cascada de energía describe el comportamiento característico de un sistema cuya energía desciende de movimientos a gran escala (vórtices, etc.) cuyo espectro máximo está dado por números de onda muy reducidos, hacia longitudes de escala cada vez más reducidas, como una "cascada" que recorre todo el espectro a medida que evoluciona el sistema.

En un sistema entrópico común también hay desorden; tanto la cascada como el desorden son elementos esenciales del concepto común de que el orden degenera en desorden (cuya expresión formal es la segunda ley de la termodinámica). En las situaciones más usuales, las oscilaciones de escalas cada vez más reducidas suelen orientarse al azar unas de otras, y terminan por cancelarse mutuamente. La expresión matemática de esta característica sería que la distribución de fase dentro del modo es aleatoria, de manera que la cresta de una onda contrarresta las depresiones de muchas otras. Para emplear nuevamente la analogía con la cuerda de piano: a medida que muere la oscilación de la cuerda, la multitud de frecuencias armónicas que dependen de ella se hacen más y más caóticas, y se tornan finalmente en energía calórica de la cuerda.

(a) Cascada de energía

Espectro de energía



(b) Fase aleatoria

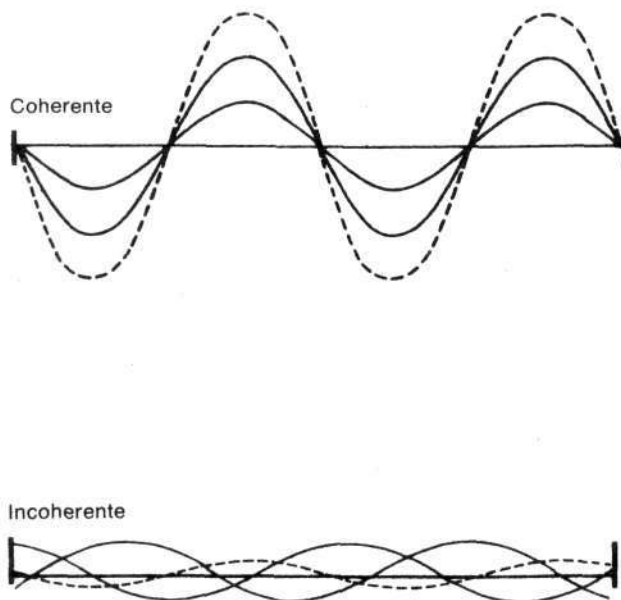


Figura 4
TRES MAGNITUDES CENTRALES DEL PLASMA

La frecuencia electrónica del plasma (frecuencia de Langmuir), el modo característico de alta frecuencia de un plasma no magnetizado, es causada por la oscilación de los electrones dentro del campo electrostático que ocasiona su propio movimiento con respecto de los iones. En esta escala temporal, los iones son esencialmente estacionarios. Esta magnitud y sus movimientos correspondientes sólo existen dentro de los límites de una oscilación muy reducida de los electrones.

La densidad de energía coherente es el coeficiente entre la energía de cualquier campo eléctrico coherente y la energía aleatoria que determina la temperatura del plasma. Cuando el coeficiente es pequeño, se dice que el plasma es de baja turbulencia. Cuando es grande, los conceptos que definen sus partes dejan de tener significado.

La velocidad de Alfvén es la velocidad característica con que se desplaza la energía coherente dentro de un plasma magnetizado. El campo magnético sostiene las ondas de Alfvén que viajan a esta velocidad. Cuando la energía de estas ondas pasa de ser infinitesimal, el movimiento ondulatorio organiza nuevas configuraciones del campo magnético.

Estos tres números dan una buena idea de los procesos fundamentales de un plasma. Se derivan de consideraciones estrictamente lineales, y no describen con rigor alguno el comportamiento experimental de un plasma. No obstante, constituyen valiosas guías de los tipos generales de fenómenos característicos de determinadas etapas en la evolución un tanto más complicada de un plasma.

$$\sqrt{4\pi n e^2 / m}$$

(a) Frecuencia de Langmuir

$$E^2 / 8\pi n T$$

(b) Densidad de energía coherente

$$B / \sqrt{4\pi n m_i}$$

(c) Velocidad de Alfvén

mentos del mismo tipo con otros fluidos. En segundo lugar, estas observaciones han demostrado que los remolinos cada vez más pequeños nunca se suman para constituir un solo vórtice fuerte (aunque pequeño); siempre se distribuyen al azar.

Estos resultados son definitivamente los que cabría esperar. Todos sabemos que cuando revolviendo el café por la mañana, el azúcar y la leche se mezclan uniformemente debido a la aleatoriedad de la turbulencia. El primer proceso que observamos es lo que se llama cascada de energía, debido a que la energía del movimiento de un fluido desciende como en cascada a través de una serie de etapas en las cuales se reduce cada vez más la escala del movimiento. El segundo proceso, el arreglo desordenado de estos movimientos (el cual aumenta en la medida en que disminuye su escala) se llama *aleatoriedad de fase*. Esta aleatoriedad es análoga a la propiedad de fase de una onda que le permite combinarse con otras ondas para formar una sola onda mayor (fase coherente), o hace que todas las ondas se cancelen entre sí (fase aleatoria).

En otros términos, estos dos conceptos son versiones más rigurosas de lo que dicta el sentido común respecto de la evolución de la materia en general, es decir, que si se deja por sí sola, la materia degenera en estados de desorden cada vez mayor, y todo movimiento de gran escala se disipa con el transcurso del tiempo (figura 3).

Imaginemos una situación donde esto no ocurriera. Al llevarla al comedor en la mañana, sacudimos involuntariamente nuestra taza de café: las onditas desordenadas que

se forman inicialmente en la superficie se salen de su fase aleatoria, y se forma un vórtice más y más fuerte en la taza, hasta que salta de ella un torbellino de café caliente. ¡Increíble! Tal vez, pero esto es exactamente lo que sucedió en los experimentos de Wong y Quon.

El plasma reacciona a esta situación experimental de una manera diferente, debido a las propiedades físicas descritas anteriormente: sus interacciones de largo alcance, la mutua determinación de fuentes y campos, y la naturaleza esencialmente no lineal de estas interacciones. Hay varias cantidades clave que ayudan a medir la importancia y el efecto de estas interacciones (resumidas en la figura 4). La que viene más inmediatamente al caso de la interacción entre un plasma y un haz de electrones es la frecuencia electrónica del plasma (frecuencia de Langmuir). Esta frecuencia es la reacción característica de alta frecuencia de un plasma.

Se puede definir una cantidad similar prácticamente para cualquier sistema físico. Considérese, por ejemplo, una cuerda de piano. En el caso de una sola cuerda, hay un tono característico, llamado fundamental, que produce la cuerda sin importar dónde se golpee. La mezcla de tonos armónicos con el fundamental puede variar, y en efecto el martillo se diseña para producir una combinación tan agradable como sea posible, pero la respuesta de la cuerda está dominada por el tono fundamental. Como veremos, un plasma tiene una cantidad innumerable de tales modos normales, y el más alto de todos corresponde a la frecuencia de Langmuir.

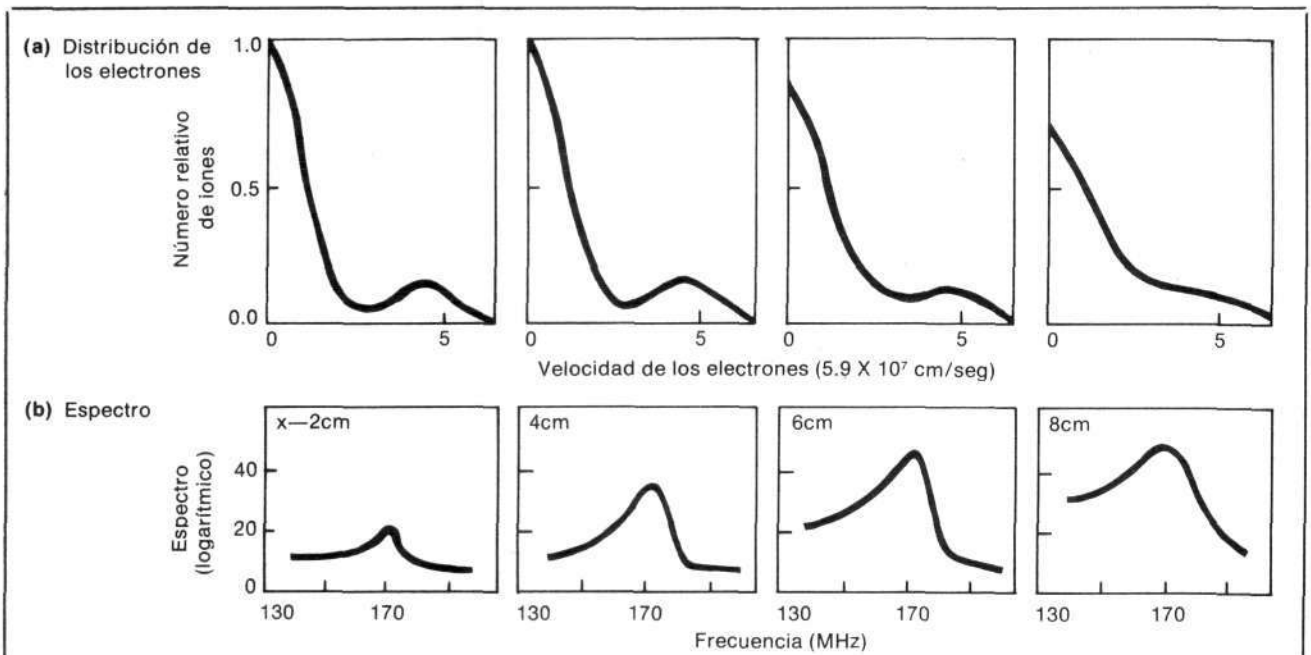


Figura 5

EVOLUCION DE LA ONDA DE PLASMA Y DE LOS ELECTRONES EN EL EXPERIMENTO DE WONG Y QUON

Los cuadros de la serie **a** muestran la distribución de los electrones en función de la velocidad a medida que el haz se propaga dentro del plasma. En el primer cuadro, el gran pico de la izquierda representa el equilibrio térmico de fondo existente en el plasma antes de entrar el haz de electrones. Esta es la distribución clásica maxwelliana de las velocidades electrónicas. El eje vertical representa la proporción de electrones cuya velocidad se especifica sobre el eje horizontal. El pico menor que aparece cerca al 5 representa el haz de electrones. A medida que el haz se sigue propagando dentro del plasma, suceden dos cosas; la energía del haz disminuye, y la elevación de la izquierda cambia de forma. La energía del haz va en parte a calentar la masa principal de electrones, distribuyéndolos más uniformemente, y otra parte se incorpora a las ondas Langmuir de alta frecuencia.

Los cuadros de la serie **b** muestran la energía correspondiente en el campo electrostático de alta frecuencia. Las cuatro posiciones del plasma son más o menos las mismas que en los cuadros de la distribución electrónica. A medida que el haz de electrones pierde energía, las ondas de alta frecuencia, u ondas de Langmuir, la captan. La frecuencia del plasma es de unos 170 MHz (millones de ciclos por segundo). Esta protuberancia aumenta rápidamente en magnitud a medida que el haz se propaga en el plasma. Lo que no se puede observar en estas gráficas son los fenómenos complementarios de disminución de la longitud de onda de esta energía, y la coherencia de fase de tales ondas.

El mecanismo físico que produce esta oscilación es la más simple interacción electromagnética posible entre partículas, una atracción puramente electrostática. Si se perturban los electrones a modo de apartarlos ligeramente de los iones en el plasma, la atracción electrostática los impulsará a regresar a sus posiciones de equilibrio. Si la perturbación es extremadamente leve, los cálculos clásicos (que en este respecto son adecuados) muestran que al regresar los electrones irán más allá de su posición inicial, y oscilarán a una frecuencia característica.

Podría hacerse la comparación con una colección de bolas montadas sobre resortes, todas conectadas entre sí. Si al golpear el conjunto las ponemos en movimiento, veremos que las bolas continúan oscilando alrededor de sus posiciones originales. El valor de la frecuencia de Langmuir es $\sqrt{4\pi n e^2/m}$, donde m es la masa del electrón (la frecuencia es inversamente proporcional a la masa), n

es la densidad de los electrones (entre mayor es ésta, mayor es la frecuencia, ya que la fuerza restauradora también es mayor), y e es la carga del electrón.

Cuando el haz de electrones penetra en el plasma, desplaza energicamente los electrones, y la primera reacción del sistema es la deposición de una gran cantidad de energía en la oscilación de electrones en el plasma. La figura 5 muestra la evolución temporal del sistema haz-plasma, y el primer conjunto de cuadros de la figura muestra la evolución temporal del haz de electrones y el plasma. La idea de la oscilación del plasma, sin embargo, presenta de inmediato un problema. Este modo de interacción electrónica sólo existe cuando hay una posición de equilibrio definible y cuando los electrones se apartan ligeramente de esta posición. En los experimentos de Wong y Quon, esta posición de equilibrio desaparece casi inmediatamente.

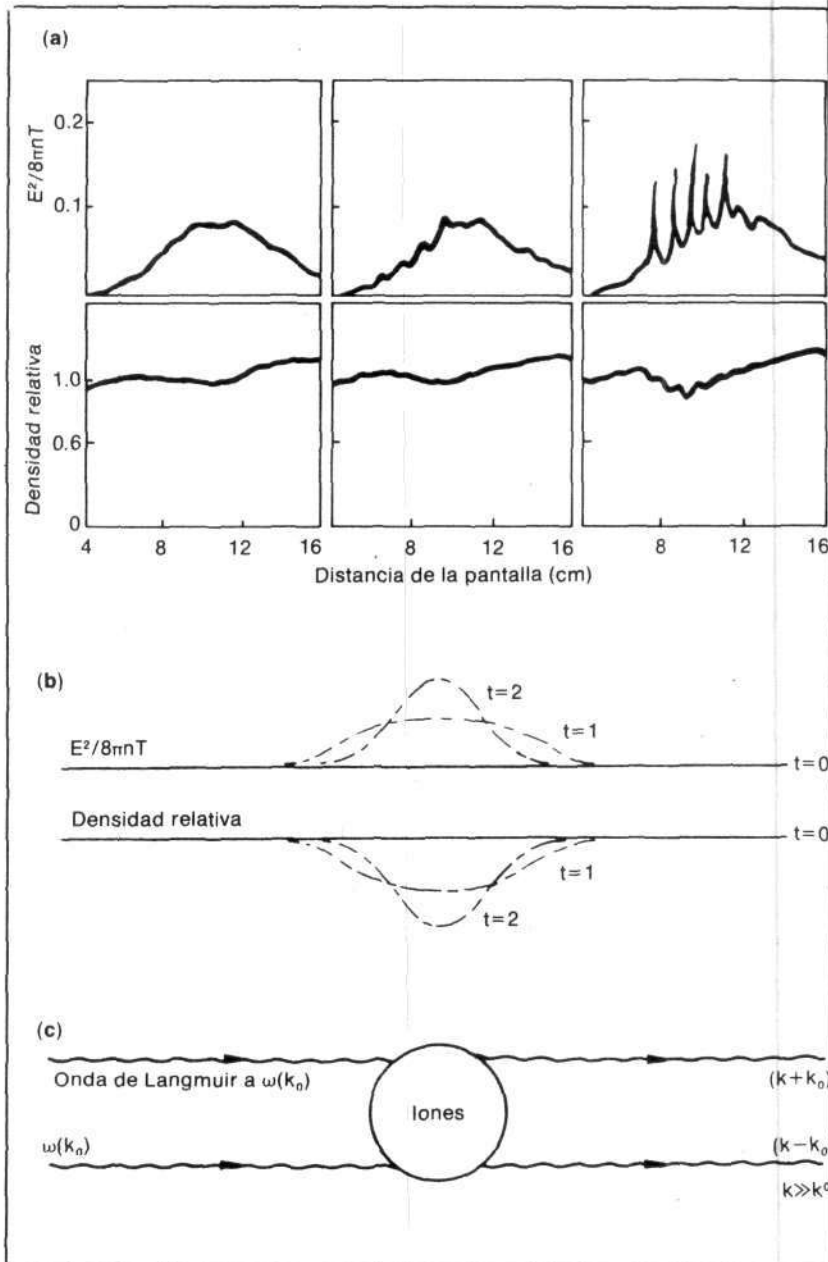


Figura 6
LA INESTABILIDAD MODULATORIA

En **a**, las gráficas muestran la evolución cronológica en el plasma del coeficiente de densidad energética (arriba) y la densidad iónica (abajo). Lo que más llama la atención es la coincidencia del solitón, indicado por el coeficiente de densidad energética, con la depresión que ocurre en el índice de densidad iónica. El estado final obtenido en el experimento de Wong y Quon consistía en cinco solitones a intervalos de poco más de un centímetro entre sí. Este estado se puede observar en el último par de gráficas.

En **b**, Tsytovich muestra esquemáticamente las primeras etapas de evolución del solitón según lo pronostican las ecuaciones modelo normales. El proceso constituye lo que él llama inestabilidad moduladora, en la cual el aumento de la densidad energética del campo de alta frecuencia expulsa el plasma, lo cual a su vez intensifica el componente de onda corta (altos valores de k) del campo.

La interacción no lineal entre onda y onda que ocasiona el desplazamiento de la energía ondulatoria (de campo) hacia longitudes de onda menores (mayores valores de k) se muestra esquemáticamente en **c**. Dos ondas plasmáticas (de Langmuir) interactúan mediante una perturbación de la densidad iónica ("iones"), "colisión" mediante la cual se transfiere momento; de ella emergen dos ondas plasmáticas cuya longitud de onda es menor.

La inaplicabilidad de esta suposición de linealidad matemática se puede medir por la densidad de la energía coherente del plasma, que es la segunda cantidad mostrada en la figura 4. Aquí se supone que la perturbación de la posición de los electrones es tan pequeña que sólo hace falta tener en cuenta su primera potencia —la potencia lineal—; los términos superiores, no lineales, son tan pequeños bajo estas condiciones que se pueden descartar por completo. Esta cantidad es el coeficiente de la energía contenida en las ondas de electrones en el plasma sobre la energía del movimiento aleatorio (térmico) del mismo. Ya que la energía de las ondas de electrones en el plasma se puede medir mediante el campo eléctrico que crean (el mismo campo que retiene los electrones), esta energía tiene una densidad definida por

$E^2/8\pi$, donde E es la intensidad del campo eléctrico, y la densidad energética del movimiento térmico del plasma es simplemente el producto de su densidad y su temperatura. El coeficiente de estas dos cantidades da una medida del orden del movimiento en el plasma. El régimen lineal (llamado turbulencia débil) tiene un valor de $E^2/8\pi nT$ muy inferior a 1; esto es, la energía desordenada es mucho mayor que la energía con que oscilan los electrones en el plasma.

Las gráficas espectrales de la evolución temporal de la energía en el plasma (figura 5) muestran que al poco tiempo de penetrar en el plasma, la energía del haz genera en él una oscilación electrónica de gran amplitud. La evolución de esta energía es extraordinaria. No decae en movimientos aleatorios desordenados en el plasma (calor);

crea en cambio una estructura localizada en el plasma, altamente ordenada, parecida a una partícula. A esta concentración de energía se le llama *solitón*.

El proceso de evolución del sistema haz-plasma al nuevo nivel energético definido por la acción del haz se muestra en el primer conjunto de gráficas de la figura 6. Estas gráficas muestran la energía en función de su *posición física* en el plasma. (Estas gráficas no son espectros en los cuales la energía aparece como función de la longitud característica o el inverso de la longitud del movimiento que transporta la energía). En lugar de dispersarse en el plasma, la energía se ha concentrado en una serie de picos muy agudos cuya *densidad energética* en sus estados finales es igual a la densidad de la energía aleatoria del "fondo". Se trata de un comportamiento sorprendente.

En el caso de la evolución del flujo de agua, su estado final aleatorio se puede describir en términos de la cascada de energía para pequeñas longitudes de onda (valores grandes de k , el inverso de la longitud de onda) y la aleatoriedad de las fases de los movimientos que contienen esta energía. Ambos procesos son críticos. En el caso de la evolución totalmente diferente del sistema haz-plasma, estos dos conceptos arrojan un poco de luz sobre por qué el plasma actúa de una manera tan diferente. En el caso del plasma, la energía desciende en cascada hasta una longitud de onda pequeña (un valor alto de k), como deja claro el estudio de la figura 6. El espectro correspondiente a los primeros momentos forma picos a grandes intervalos, porque la energía se distribuye uniformemente por todo el sistema. A medida que pasa el tiempo, los picos más agudos indican que el espectro se desplaza hacia mayores valores de k (pequeñas longitudes de onda). Esta es la cascada de energía más corriente, la cual en el caso de un fluido viene acompañada del fenómeno macroscópico de la disipación de energía.

En el plasma, sin embargo, estas pequeñas concentraciones de energía ocurren en una fase muy precisa. La carencia de fase aleatoria significa que los muchos cúmulos pequeños de energía se suman constructivamente, de tal forma que en el espacio físico del plasma (como lo muestra la figura) se forman concentraciones de energía muy intensas, altamente estructuradas y localizadas. En algunas situaciones, estas estructuras pueden resultar en un incremento de hasta 100,000 veces la densidad energética del plasma. En el experimento de Wong y Quon, el haz de electrones creó cinco solitones de éstos, a intervalos de poco más de un centímetro entre sí. El último cuadro de la figura 6 los muestra claramente.

Al intentar comprender el origen del sorprendente fenómeno del solitón, los físicos que estudian el plasma se han topado con graves interrogantes que reflejan la paradójica situación de la física moderna en general. Los conceptos y el instrumental matemático disponibles son aptos para fundamentar una cierta intuición sobre el proceso general, y si uno está dispuesto a pasar por alto uno que otro problema clave, como la existencia de los solitones, entonces el comportamiento y las interacciones del proceso se pueden entender. Sin embargo, todo intento de tratar rigurosamente el fenómeno ha puesto

de manifiesto contradicciones internas en el aparato matemático empleado, y ha evidenciado la obvia necesidad de nuevas herramientas conceptuales.

La física de plasmas basada en el electromagnetismo de Maxwell y la mecánica de Newton es un tanto útil para describir la formación de los solitones y su dinámica física, pero es inadecuada cuando se trata de explicar la existencia misma de estos solitones o la estabilidad de un plasma que resulta de una colección de ellos.

La visión corrientemente aceptada de cómo se forman los solitones se describe en la figura 6. La primera etapa del proceso es la intensificación de la turbulencia ondulatoria del plasma. En el tipo simple de plasma del experimento de Wong y Quon, estas ondas son las ondas de Langmuir. La modificación del espectro de Langmuir puede producirse mediante un haz de electrones, como en el caso observado aquí, o con rayos láser o de alguna otra manera. De acuerdo con la explicación lineal acostumbrada, estas ondas no interactúan entre sí; como en el caso de la cuerda de piano, las diferentes longitudes de onda de la onda de Langmuir son independientes y no intercambian energía.

Sin embargo, tan pronto como la densidad energética de las ondas de Langmuir alcanza un punto crítico bien definido, estas ondas comienzan a intercambiar energía entre sí de una manera bien definida. Se cree que el modo dominante de tal interacción en la formación de los solitones es la llamada *inestabilidad moduladora*. Esta inestabilidad es lo que causa la *transferencia de energía* de las ondas de Langmuir de gran longitud de onda (valores pequeños de k) a aquellas con longitudes de onda menores (valores grandes de k), produciendo el tipo usual de cascada de energía en el espectro de Langmuir.

Imaginemos que la inestabilidad moduladora es fruto de un simple circuito de retroalimentación dentro de la dinámica del plasma. Cuando el campo eléctrico del plasma alcanza el punto crítico donde se inicia el proceso, la presión del campo expulsa de su paso a los iones del plasma, creando una pequeña depresión en la densidad del mismo. En el interior de esta depresión, la proporción entre la energía coherente del campo y la energía principal o "de fondo" (el parámetro $E^2/8\pi nT$) es más grande, ya que hay menos plasma, y se desplaza más energía a las longitudes de onda menores.

A su vez, esto expulsa más plasma de la depresión, con lo cual comienza nuevamente el proceso. Este proceso autoalimentador se muestra en la figura 6a, donde es clara la correspondencia estrecha entre los solitones de la energía del campo con las depresiones de densidad del plasma iónico circundante.

La tercera parte, la figura 6c, muestra el mecanismo hipotético que sirve como enlace crítico para el desarrollo de la inestabilidad moduladora. Las ondas del plasma linealmente independientes se muestran en el diagrama de la izquierda; cuando la intensidad de estas dos ondas (parte del mismo espectro ondulatorio del plasma) es suficientemente grande, ellas dejan de ser independientes y pueden interactuar entre sí, debido al efecto que surten en la densidad iónica (como se muestra en el centro de

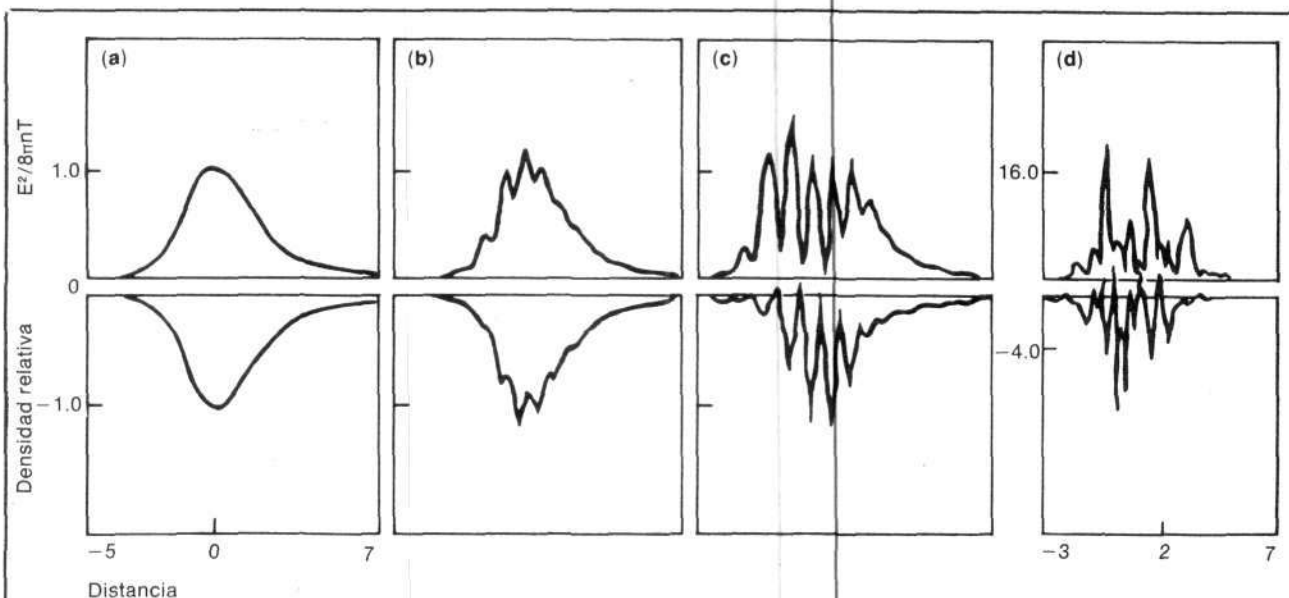


Figura 7

SOLUCIONES GENERADAS POR COMPUTADORA PARA LA FORMACION DE SOLITONES

Las primeras etapas de la simulación numérica producida por la computadora (a y b) muestran lo que cabría esperarse según las más sencillas consideraciones físicas, y corresponden efectivamente al comportamiento observado experimentalmente. Nótese en particular la confirmación de la inestabilidad moduladora evidenciada por la simultaneidad con que se forman las cavidades iónicas en los cuadros inferiores y los solitones del campo eléctrico de alta frecuencia (arriba).

Las etapas posteriores de esta misma solución numérica muestran una sorprendente divergencia del modelo físico sencillo de la inestabilidad moduladora. En las etapas avanzadas, no lineales, de esta evolución (c y d), los solitones y los cavitones existen independientemente entre sí, y no se forman ni viajan juntos. Morales y Lee recalcan que este fenómeno, para el cual todavía no hay explicación, ocurre matemáticamente cuando entra en efecto la coherencia de fase de la energía del campo eléctrico, y especulan que el comportamiento patológico de su solución se debe a esta propiedad matemática anómala.

la figura). El resultado neto es la formación de dos nuevas ondas del plasma cuya longitud de onda es menor (el valor de k aumenta). Es como si las dos ondas chocaran con la fluctuación de la densidad iónica, adquiriendo momento de los iones del plasma y sacándolos aún más de la zona de depresión de la densidad. Entonces las mismas ondas salen de la colisión con un momento mayor (menor longitud de onda y mayor valor de k).

Este cuadro, sin embargo, sólo es válido dentro de los límites de una intensidad ondulatoria muy baja del plasma; o sea, bajos valores del parámetro $E^2/8\pi nT$. No es difícil ver que si hay interacciones no lineales entre onda y onda como las descritas en la figura 6, donde intervienen dos ondas de plasma, deben ocurrir interacciones similares donde intervienen tres, cuatro o aún más ondas. Estas interacciones dependen de mayores potencias del parámetro $E^2/8\pi nT$. A medida que se hace mayor esta proporción, la posibilidad de potencias mucho menores que 1 es mínima.

Aún en sus propios términos, el cuadro físico descrito gráficamente en la figura 6 es inadecuado para describir la formación de los solitones en un plasma. No hay duda de que este cuadro suministra cierta información válida al

respecto, pero no da una explicación científica del fenómeno.

Los físicos de plasmas han reaccionado de dos maneras diferentes ante esta situación. Algunos han seguido adelante en sus esfuerzos por elaborar una física capaz de describir la interacción y la influencia mutua de los solitones, pasando de largo la cuestión de por qué existen; otros han intentado describir *rigurosamente* la existencia de los solitones sobre la base de la física y las matemáticas como se tienen entendidas actualmente.

La disyuntiva es aquí similar a la de la teoría electromagnética: la física de hoy no puede explicar la existencia del electrón; uno puede dar por sentada la existencia de esta partícula y seguir adelante en la física sin molestarse en indagar los motivos de la estabilidad y la existencia misma del electrón; o, como en la mecánica cuántica moderna, tratar de darle la más rigurosa explicación posible ... y fracasar.

La escuela de Tsytovich

Algunos físicos han optado por la primera alternativa, principalmente aquellos físicos educados en la escuela soviética inspirada por V. N. Tsytovich, cuyo programa

está aún en la infancia. Tsytovich ha construido un modelo matemático de lo que él llama un nuevo estado plasmático, un estado de gran turbulencia (donde $E^2/8\pi nT$ es aproximadamente igual a 1) formado por una colección de solitones. Estos solitones y sus semejantes son las nuevas partículas elementales que constituyen el plasma. El método de Tsytovich no se molesta con descripciones rigurosas del hecho de que el solitón es la nueva partícula elemental del plasma; simplemente lo da por sentado, y se limita a describir cómo podría comportarse un plasma compuesto de tales partículas.

El grupo de Tsytovich ha tratado de construir un plasma a partir de la conjunción de los diferentes modos nuevos que ocurren en un plasma de gran turbulencia: solitones, cavitones (nombre dado a las depresiones de densidad que acompañan a los solitones), "espicones" (otra forma de solitones), etc. Todas estas entidades se usan luego para definir un nuevo estado estadístico básico, con una temperatura característica y con una nueva distribución equilibrada de energía y velocidad. El método de Tsytovich prescribe entonces la deducción de una nueva jerarquía de la linealidad a partir de la nueva configuración básica del plasma de solitones. Tsytovich escribe:

Un programa para establecer una teoría de turbulencia fuerte mediante la investigación de los movimientos dinámicos particulares como los solitones, los cavitones, los espicones, etc. (por sí solos) difícilmente podría ser consistente, no solamente por cuanto es prácticamente imposible tomar en cuenta toda la variedad real de tales fenómenos, sino también (y esto es lo más esencial) porque la interacción entre estos movimientos dinámicos hace que sus propiedades cambien cualitativamente. Por lo tanto, nos parece que un enfoque basado en principios estadísticos tridimensionales para describir las distintas perturbaciones modulatorias se puede considerar como un primer paso hacia la teoría necesaria para describir adecuadamente este nuevo estado plasmático.

Aparte del grupo de Tsytovich, sólo un puñado de especialistas en la materia se ha puesto la tarea de describir rigurosamente la existencia y la estabilidad de las perturbaciones modulatorias y de los solitones. La figura 7 muestra los sorprendentes resultados obtenidos por computadora como solución de ecuaciones que supuestamente describen la evolución de los solitones. Las gráficas muestran, como en secuencia cinematográfica, la evolución del plasma respecto del tiempo transcurrido. En varios de los primeros cuadros, la solución generada en la computadora se comporta de una manera muy parecida a lo observado en los experimentos de Wong y Quon. Lo más interesante es la aparente verificación del proceso físico básico de concentración de energía en el solitón (la formación de solitones), y la disminución de la densidad iónica dondequiera que aparece un solitón. Este es el mecanismo de retroalimentación, elemento central del concepto de inestabilidad modulatoria.

En la solución generada por computadora, sin embargo,

este proceso se descompone bien pronto, y los solitones se siguen formando de una manera aparentemente aleatoria, independientemente de que haya o no haya cavidades iónicas. El último cuadro muestra un plasma en el cual hay varios solitones que no guardan relación con las depresiones iónicas. Los autores de este trabajo, B. Morales y Y. Lee, quienes estudiaron a fondo esta anomalía, concluyeron que la descripción matemática que emplearon comienza a fallar justamente cuando la coherencia de fase empieza a ser el efecto dominante. El ordenamiento de las fases de los solitones formados por el proceso de modulación causa un cambio cualitativo en las propiedades de los solitones generados por las ecuaciones. Esto crea un plasma que difiere fundamentalmente de su estado inicial, al parecer caracterizado por interacciones físicas distintas. El punto en el cual ocurre la transformación es exactamente cuando la linealidad de los solitones anotada anteriormente deja de describir adecuadamente el plasma, y prevalece en cambio la nueva propiedad de autoordenamiento de fase.

Estas soluciones numéricas a las ecuaciones que supuestamente describían a los solitones originaron ciertas interrogantes de peso en cuanto a si la descripción era en efecto adecuada. La dificultad para estudiar las implicaciones rigurosas de las ecuaciones empleadas en la física de plasmas para describir a los solitones (así como muchos otros fenómenos no lineales) se deriva de las propiedades distintivas de un plasma. Lo más importante es el hecho de que los campos y las fuerzas de un plasma se deben determinar de una manera autoconsistente con los movimientos de las fuentes de dichos campos y fuerzas. Es decir, para conocer las fuerzas que inciden sobre los electrones y los iones, necesitamos saber dónde están éstos y qué tan rápido se mueven, pero para determinar las posiciones y velocidades de las partículas, necesitamos conocer las fuerzas que actúan sobre ellas.

En una aproximación lineal, por lo general se puede llevar a cabo una serie de cálculos aproximados; se toman primero, por ejemplo, las posiciones y las velocidades de las partículas, y luego se calculan las fuerzas creadas por esta configuración particular. De allí se puede calcular el efecto de este juego de fuerzas. En el caso lineal, el efecto es lo suficientemente pequeño como para que las nuevas posiciones y velocidades de las partículas difieran mínimamente de la aproximación inicial, y después de varias rondas de tales cálculos, se puede obtener una solución autoconsistente tanto para los campos como para las partículas. Este procedimiento permite corregir las soluciones lineales de tal forma que se convierten en soluciones rigurosamente correctas de las ecuaciones, siempre y cuando los cálculos converjan en un mismo estado del plasma.

Al intentar usar esta técnica para describir la inestabilidad modulatoria y por tanto derivar una solución rigurosa al problema de la existencia del solitón, un grupo de científicos del laboratorio de Los Alamos, en Nuevo México, derivó un proceso de cálculo similar al descrito anteriormente. Su primera etapa da las soluciones usuales al solitón, basándose en el supuesto inicial de que los iones

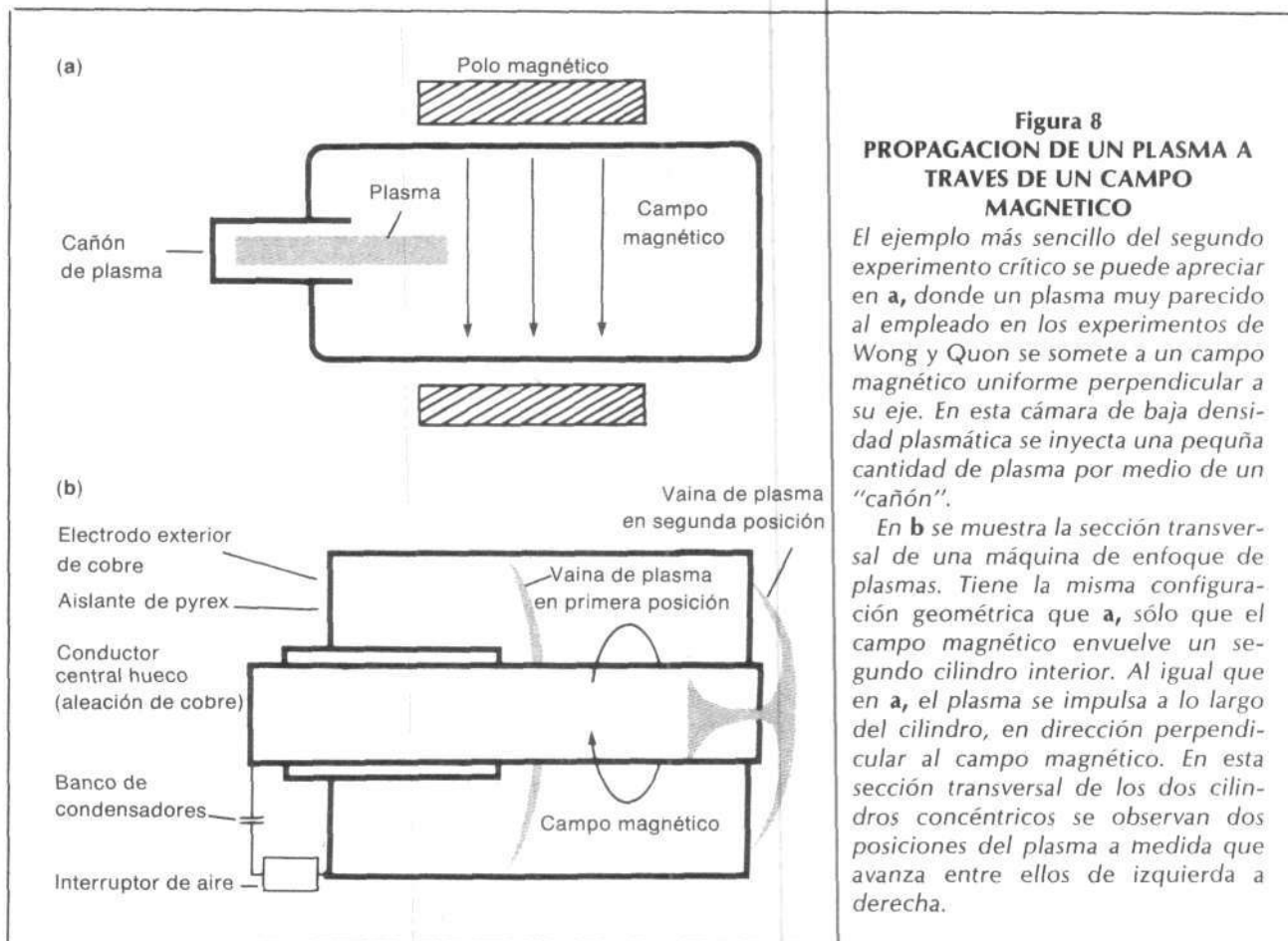


Figura 8
PROPAGACION DE UN PLASMA A
TRAVES DE UN CAMPO
MAGNETICO

El ejemplo más sencillo del segundo experimento crítico se puede apreciar en **a**, donde un plasma muy parecido al empleado en los experimentos de Wong y Quon se somete a un campo magnético uniforme perpendicular a su eje. En esta cámara de baja densidad plasmática se inyecta una pequeña cantidad de plasma por medio de un "cañón".

En **b** se muestra la sección transversal de una máquina de enfoque de plasmas. Tiene la misma configuración geométrica que **a**, sólo que el campo magnético envuelve un segundo cilindro interior. Al igual que en **a**, el plasma se impulsa a lo largo del cilindro, en dirección perpendicular al campo magnético. En esta sección transversal de los dos cilindros concéntricos se observan dos posiciones del plasma a medida que avanza entre ellos de izquierda a derecha.

son estáticos. De igual manera que en las situaciones físicas donde ocurren ondas de plasma (Langmuir), el grupo de Los Alamos comenzó con iones cuyo movimiento es mucho más lento que el de los electrones, de tal forma que se puede despreciar del todo (en primera aproximación), y el mismo campo eléctrico restaurador que causa las oscilaciones características de una onda de plasma podría dar lugar a la situación de los solitones descrita anteriormente.

En el tipo usual de problemas de plasma, los nuevos campos creados por el movimiento de los electrones perturban ligeramente los iones, y este efecto se puede introducir en la segunda parte de los cálculos, con una pequeña alteración del movimiento del ión y del electrón. Sin embargo, el grupo de Los Alamos obtuvo resultados verdaderamente sorprendentes: estos cálculos *no* convergen en la inestabilidad moduladora. Tan pronto como intentaron calcular el efecto de segundo orden, considerando la fuerza del campo eléctrico del proceso de modulación, las ecuaciones se hicieron infinitas.

Estas ecuaciones infinitas constituyen un gran problema. La justificación que se da para resolver un problema linealmente se basa en suponer que los términos despreciados son pequeños, y que la serie total de términos se puede calcular al menos en principio, pero el efecto de añadir cada nuevo término sería ínfimo. En el caso del

solitón, se entiende muy bien el primer término de la serie (el término lineal), pero todo intento de calcular el segundo da un resultado infinito.

En términos matemáticos, el problema se debe a la coherencia de fase de la inestabilidad moduladora. La coherencia de fase de la energía del solitón crea una singularidad en las ecuaciones, y esto hace que los términos de las mismas sean infinitos. Esta coherencia de fase es la causa de las dificultades matemáticas que surgen en el método del grupo de Los Alamos, así como en las soluciones de computadora de Morales y Lee.

Como todos los cálculos de este tipo en la física de plasmas, la convergencia de la serie de términos depende de la validez de una aproximación llamada *aproximación de fase aleatoria*, lo cual asegura que los diferentes modos del plasma no se afecten coherentemente unos a otros. Sin embargo, en el caso de los solitones, la dinámica física del plasma crea coherencia donde antes no la había, (o, alternativamente, amplifica una coherencia que antes era mínima), y así invalida las bases de la teoría. El resultado inmediato es un valor infinito; si la diferencia de fase es cero, también lo será el denominador.

Lo extraordinario es que la singularidad creada en un plasma por la coherencia de fase es esencialmente idéntica a las singularidades que han echado a perder los intentos de describir el electrón en la electrodinámica cuántica.

Para describir el fenómeno del solitón es indispensable dar cuenta del autoordenamiento de fase. Sin embargo, cuando uno intenta esto de una manera rigurosa, las ecuaciones se invalidan en la misma forma en que se invalidan las ecuaciones al tratar de describir la fuente única del problema más simple del campo electromagnético: el electrón. Obsérvese en primera instancia que la coherencia de fase es responsable del hecho de que la energía de todas las distintas ondas del plasma se superponen en el mismo lugar para dar origen a los solitones. Sin la coherencia de fase de esta energía ondulatoria, la energía contenida en las ondas de longitud corta se disiparía, como sucede usualmente en un plasma o en un fluido, haciéndose aleatoria.

La física versus la evidencia experimental

Hoy los físicos reconocen que la incapacidad para describir la existencia del electrón y las infinidades que resultan de intentar su construcción matemática indican una dificultad *fundamental* en la física. Casi siempre piensan, sin embargo, que esta dificultad no se extiende a otras áreas de la física, ya que, como se sitúan en diferentes regímenes de energía, no se tendrán que modificar cuando se formule una nueva teoría del electrón. La mayoría de los físicos se imagina que la situación es similar a la de la astronomía antes de que se formulara la teoría de la relatividad: en las escalas de energía que rigen para el sistema solar, la vieja mecánica celeste basta para describir todos los movimientos planetarios, salvo en sus pormenores mínimos.

El problema está en que la evidencia de la física de plasmas muestra que esta es una creencia errónea. En una escala de energía (es decir, densidad energética), supuestamente descriptible según leyes físicas que podrían pasar de largo los problemas de la estabilidad y la existencia del electrón, vuelve a aparecer el mismo problema de la coexistencia de un campo magnético y su fuente, estropeando todo intento de describir teóricamente el plasma. Este es un problema que no se puede descartar fácilmente.

Por otra parte, esta dificultad en la física de plasmas presenta la ventaja de que ahora se puede tratar experimentalmente el fenómeno de la interacción campo-partícula. Un sinnúmero de aspectos importantes del problema, no sólo están más claramente delineados en este caso que en el de la electrodinámica cuántica, sino que también son accesibles a la investigación empírica.

Quizá el aspecto más obvio que exhiben los datos sobre el solitón obtenidos por Wong y Quon es el papel central de la densidad energética en la caracterización del proceso de desarrollo del solitón. La situación es paradójica. Por un lado, es cierto que el concepto convencional de energía guarda correspondencia con los aspectos esenciales del problema del plasma. Por ejemplo, la función central de la proporción entre la energía coherente y la energía aleatoria es esencial para comprender la fenomenología del solitón.

Aún así, el concepto de energía como una simple cantidad escalar es insuficiente. Primero que todo, en el caso de un plasma la energía es una cantidad *modal*. La

idea común de energía es una proyección escalar de alguna propiedad del sistema que prescribe su evolución. Sin embargo, un concepto correcto de energía no es simplemente cuestión de "cuánto", sino también de "por qué", y "en qué sentido".

Esto es claro en el caso de la evolución del solitón: al describir el solitón, se midió la energía del plasma al menos en tres formas diferentes, cada una de las cuales suponía cierta evolución del plasma. Primero es la energía térmica aleatoria del plasma (el "trasfondo" energético), que corresponde a la idea más común que tenemos de temperatura. Este concepto es coherente únicamente cuando existe un estado de equilibrio accesible y definible, alcanzable por el plasma (a esa densidad energética). Si no existe físicamente tal estado de referencia, no hay entonces temperatura para el sistema.

En segundo lugar, está el uso de la idea de energía para describir la energía contenida en el movimiento lineal coherente del plasma, específicamente la densidad energética de las ondas de alta frecuencia del plasma, $E^2/8\pi$. De nuevo, esta aplicación del concepto de energía presupone una clase específica de evolución cronológica, basada en la existencia y la dinámica de las ondas (lineales) de plasma. Si tales frecuencias de plasma, u ondas de Langmuir, no se pueden definir para el plasma, entonces esta proporción no tiene un significado positivo (por ejemplo, si los iones carecen de un estado de equilibrio en torno al cual pudieran oscilar los electrones a la frecuencia del plasma).

El concepto de energía asume un tercer aspecto cualitativo cuando el coeficiente $E^2/8\pi nT$ alcanza un valor de 1 (en el caso de los plasmas de gran turbulencia definidos por Tsytovich). Este coeficiente no expresa en sí cambios cualitativos significativos dentro del régimen, pero sirve para indicar que la evolución del plasma está determinada por una nueva cualidad de interacción física: la coherencia de fase de los movimientos a pequeña escala que "conspiran" para formar solitones.

Lo esencial aquí es que la energía no se puede definir a priori, sin que se conozcan las propiedades físicas del plasma. En cada una de estas tres fases, la energía está contenida en diferentes modos del sistema; modos que, especialmente en el caso de los solitones, toman vida por sí mismos y cambian fundamentalmente lo que es el plasma.

Es más, la suposición de que se pudiera definir a priori la energía lleva directamente a la paradoja de la existencia del solitón. En cuanto se asume que los electrones y los iones son los "ladrillos" del plasma —ladrillos inalterables, que interactúan según leyes inmodificables— las ecuaciones que se supone gobiernan esas partículas se desmoronan justamente en el momento en que la física del sistema cambia. Las ecuaciones actualmente aceptadas en la física de plasmas, basadas en las leyes de Newton y las ecuaciones de Maxwell, no pueden explicar fenómenos como el solitón, precisamente porque son incapaces de reflejar los cambios cualitativos que puede atravesar un plasma. Al momento en que un plasma experimenta realmente un cambio de fase, las ecuaciones que lo describen se tornan

divergentes. En ese sentido, el electrón y el solitón son entidades análogas: ambos son singularidades que, por sus procesos internos de concentración de energía, inducen un cambio cualitativo en la evolución del sistema que los genera.

Estos cambios en la densidad energética se manifiestan en marcadas transformaciones de la diferenciación interna del plasma. La propiedad de autoordenamiento o autoorganización que es tan sorprendente en casi todos los fenómenos no lineales, y especialmente en el plasma, es un indicador cualitativo del aspecto más básico de la evolución del sistema, aspecto del cual las acepciones corrientes de la energía como una simple magnitud cuantitativa son apenas una aproximación. El significado de la aparición espontánea del orden a partir del desorden, que tanto ha desconcertado a muchos científicos, no es meramente su carácter no entrópico; más importante aún es la evidencia que da de la coincidencia que hay entre nuevos dominios energéticos de mayor autodiferenciación y las singularidades que aparecen en tales coyunturas.

El poder de la física de plasmas como disciplina en la actualidad es la información experimental que proporciona para desenmarañar las interconexiones entre la aparición de singularidades, las transformaciones cualitativas de las leyes que gobiernan un sistema físico dado, la tendencia cada vez mayor hacia la densificación de la energía, y el inicio de la evolución autoordenada. Estos rasgos cualitativos dominan el carácter del universo como un todo (y con toda seguridad el carácter del hombre y de su ciencia). Los plasmas son un laboratorio donde se pueden estudiar tales transformaciones, y en efecto se deben dominar ahora mismo, si es que vamos a sobrevivir como especie. Lo que evidencia el experimento de Wong y Quon es que semejante dominio exige una reorientación fundamental de nuestro conocimiento de las leyes de la física. El simple hecho es que las leyes comúnmente aceptadas en la física contemporánea no sólo son insuficientes para explicar sus propios resultados, sino que estos mismos resultados las contradicen por implicación.

El trabajo de Wong y Quon plantea una serie de incógnitas muy importantes:

Primero, si el aumento de la densidad energética está ligado a diferentes tipos de evolución característicos del plasma, ¿cómo se pueden medir las cualidades y la tasa de tal evolución? El tiempo, en lugar de funcionar como un telón de fondo continuo y uniforme para la dinámica del plasma, parece ser relativo a las interacciones que tienen lugar dentro de él. ¿Cómo es esto posible?

Segundo, ¿cómo "sabe" el plasma evolucionar hacia estados cada vez más complejos dotados de niveles de energía cada vez superiores? ¿Qué es lo que impulsa esta evolución no entrópica? La entropía, el concepto más común de evolución disipativa, es una mera derivación, aplicable únicamente cuando no hay una singularidad que induzca cambios en las leyes que gobiernan el sistema. Pero ¿cuál es el aspecto que corresponde rigurosamente a esta invariante en el caso de la evolución negatoentrópica (a diferencia de la no entrópica)?

Tercero, ¿qué relación tienen los conceptos de cascada

de energía y coherencia de fase con la evolución de un plasma? Estos dos conceptos son la prueba de fuego de la fenomenología subyacente en el experimento de Wong y Quon, pero ¿cuál es el rasgo sistemático del comportamiento de un plasma que ellos reflejan? ¿Cuál es el motivo de que una singularidad inscrita en el proceso de formación del solitón altere las características continuas de los campos de un plasma? ¿Qué indica esta singularidad en el plasma mismo?

Caso de estudio número 2:

encuentro entre un plasma y un campo magnético

El experimento de Wong y Quon ha sido objeto de gran atención entre los investigadores de la física de plasmas, ya que ilustra vivamente la naturaleza profunda de las alinealidades del plasma. Hay además una serie de experimentos realizados en varios laboratorios que dan una idea aún más clara de la naturaleza del plasma y de las dificultades que presenta para la física moderna. Estos experimentos ofrecen también algunos datos empíricos absolutamente críticos para responder a las interrogantes tan elocuentemente planteadas, mas nunca como se debe solucionadas, por el experimento de Wong y Quon.

Estos experimentos son bastante sencillos, y la figura 8 muestra esquemáticamente su común denominador: la propagación de un plasma a través de un campo magnético. La estructura experimental es parecida al experimento del haz y el plasma, sólo que en este caso se ha interpuesto un campo magnético uniforme perpendicular al movimiento del plasma. No existe una analogía útil entre la propagación del plasma a través de un campo magnético y fenómenos característicos de otros fluidos; el campo magnético y sus relaciones energéticas constituyen un nuevo grado de libertad que diferencia al plasma sustancialmente de cualquier fluido no eléctrico.

Veamos primero el caso más simple, menos aderezado, de este fenómeno, tal como se puede observar en la figura 8. Estos experimentos, realizados en el Instituto Tecnológico Stevens hacia fines de la década de los 60, produjeron resultados sorprendentes. Cuando se impulsa un plasma a través de un campo magnético ¡se forman grandes vórtices! La figura 9 muestra varias fotografías, tomadas con una técnica de gran resolución, que captan lo esencial del fenómeno. Cuando un plasma atraviesa un campo magnético, aún en los casos de bajísima energía como el que vemos aquí, el plasma se retuerce en grandes vórtices que se orientan perpendicularmente a la dirección del campo magnético. Estas fotografías son la más clara e inequívoca muestra de tal comportamiento. Los demás casos que examinaremos tratan este fenómeno en regímenes de energía más alta con dispositivos experimentales más complejos (como el foco de plasma de la figura 8), pero el sobresaliente comportamiento del plasma se pone de manifiesto aún en el caso más simple.

Para poder explicar estos vórtices es indispensable echar mano del instrumental conceptual contemporáneo relativo a los plasmas magnetizados, aunque con las mismas reservas que señalamos en el caso de los solitones. Desde el punto de vista más reduccionista, lo que hace un campo

magnético como el mencionado arriba es deformar las órbitas de las partículas cargadas del plasma. Por ejemplo, en la figura 4d, la representación de la deformación muestra que las partículas cargadas tienden a dar vueltas en forma de una espiral que se mueve en la dirección del campo magnético (o sea que las partículas giran en torno a las líneas de fuerza).

En realidad, desde este punto de vista (partícula individual-campo externo), la partícula experimenta una fuerza siempre perpendicular a la dirección de su movimiento, de manera que sigue una trayectoria circular alrededor del eje determinado por el campo magnético. (Esto es exactamente lo que sucede cuando el campo magnético es uniforme; cuando el campo magnético no es uniforme, las cosas son más complicadas, pero para el caso se puede decir que prevalecen los mismos fenómenos en general).

Sin embargo, un plasma no es una simple colección de partículas individuales dentro de un campo magnético generado desde fuera. Conforme a la física tradicional, el siguiente paso en la búsqueda de una teoría del plasma sería determinar la manera en que interactúan normalmente el plasma y el campo magnético. En el caso de la interacción entre el campo eléctrico y el plasma, esto corresponde a la onda electrónica del plasma. A este modo de interacción se le llama onda de Alfvén, y la velocidad característica de la energía que lleva la onda aparece en la figura 4.

La onda de Alfvén es una interacción colectiva entre el plasma y el campo magnético dominado por los iones. Por ello es muy lenta en comparación con la onda de plasma. La explicación básica de las ondas de Alfvén parte del hecho, señalado anteriormente, de que una partícula individual sigue una órbita alrededor de la dirección del campo magnético. A condición de que el movimiento que la partícula pueda tener normalmente sea pequeño, un campo magnético intenso la puede mantener cerca de la línea del campo magnético debido a las espirales cerradas que describe aquella alrededor de ésta. Mientras que el movimiento de la partícula sea paralelo a la línea de campo, nada lo limita; pero no puede alejarse de la línea del campo magnético. Por eso el plasma tiende a seguir las líneas de campo. De hecho, en las sencillas condiciones descritas aquí, si el plasma no presenta resistencia eléctrica éste deberá seguir la misma línea de campo desde el principio. El suponer que el plasma no presenta resistencia eléctrica equivale prácticamente a suponer que el campo magnético es tan intenso, y que los choques entre las partículas son tan pocos, que éstas no se pueden separar de las líneas o que las órbitas ideales alrededor de las líneas del campo magnético predominan en cualquier sentido.

Dentro de estas limitantes, la onda de Alfvén existe en una forma análoga a una onda de plasma. Si pulsáramos el plasma como si fuera la cuerda de un instrumento musical, se estirarían con él las líneas del campo. En este caso, las líneas del campo parecen más bien bandas elásticas: dado que están bajo tensión, al regresar a su posición original dan lugar a una oscilación cuya velocidad característica es la velocidad de Alfvén. La oscilación de

la línea del campo magnético es completamente análoga a la de una cuerda de piano, sólo que en este caso la tensión es la línea del campo y la masa es el plasma.

En el límite lineal, donde el desplazamiento de la línea del campo magnético producido por la onda de Alfvén es infinitamente pequeño, la onda de Alfvén es la forma natural en que un plasma magnetizado contiene energía. La situación es similar a la de un plasma no magnetizado en el que se observan ondas de plasma. En el caso de la onda de Alfvén, las pequeñas oscilaciones adicionales del campo magnético (es decir, la reflexión del movimiento de la línea de campo original) deben ser realmente pequeños. Como en el caso de la onda de plasma, la diferencia entre esta pequeña perturbación y el campo original debe ser tan minúscula que sólo la primera potencia de su coeficiente sería significativa; de ahí el término *lineal*. Si existiese este límite, estaría sujeto a las mismas consideraciones que la corriente de agua; a saber, que cualquier disipación o fricción que ocurra en el sistema daría lugar a dos cosas simultáneamente: cualquier energía ordenada descendería en cascada a través de una serie de pasos mediante los cuales se reduce la escala del movimiento, y prevalecería la aleatoriedad de fase. La combinación de estos dos procesos da por resultado, entonces, la distribución uniforme de la energía y posiblemente eleva la temperatura del sistema en equilibrio.

Pero los plasmas magnetizados se comportan de manera insólita. La disipación produce orden, la cascada de energía se invierte y ésta adquiere escalas cada vez mayores, y los procesos de coherencia de fase gobiernan su evolución.

Las fotografías de la figura 9 muestran con claridad este extraordinario comportamiento, al menos desde el punto de vista fenomenológico. Sin embargo, para analizar este experimento más a fondo, tenemos que examinarlo desde dos ángulos. Por un lado, podemos lograr cierto grado de comprensión de varios aspectos de este fenómeno no lineal mediante la aplicación de los conceptos teóricos existentes. Sin embargo, esta clase de análisis no lineal es útil solamente mientras el plasma no cambie cualitativamente. Dentro de la geometría relativamente fija de un plasma de baja energía que se mueve en un campo magnético es posible entender muchos de los procesos de autoorganización, como la formación de vórtices. Pero el plasma no sólo se organiza a sí mismo; forma parte de un proceso evolutivo mucho más completo, fuera del alcance de la física actual. Es en los experimentos con plasmas de alta densidad energética donde estos fenómenos cualitativamente nuevos adquieren predominio. La física actual debe examinar y comparar estos experimentos hasta donde se lo permita su corto entendimiento.

Lo que tenemos aquí son dos conceptos de no linealidad. Uno de ellos es el de la física actual, el cual, pese a su relativa simplicidad, no ha sido debidamente reconocido por la física contemporánea, aunque es lo suficiente para dar cuenta empíricamente de una gran variedad de fenómenos de autoordenamiento. Sin embargo, las estructuras autoordenadas no son importantes en sí y por sí; su importancia está en que indican la característica

fundamental del universo y su evolución negatoentrópica. La alinealidad genuina es la evolución negatoentrópica a escala universal. El papel de la ciencia consiste en valerse del primer género de alinealidad para desentrañar el segundo.

En los últimos seis años, un sinnúmero de científicos ha tratado de encontrar el porqué de los extraordinarios efectos que produce en el plasma un campo magnético. Estos estudios han mostrado, desde varios puntos de vista, que el efecto más importante de todos ellos es que los campos magnéticos de gran intensidad —y en especial los campos generados internamente— imponen una nueva condición al movimiento del plasma. Debido a la forma en que pueden restringir el movimiento de las partículas, no es difícil entenderlo. Sin embargo, estos estudios muestran algo de mayor importancia: la condición que impone el campo magnético al plasma es de tal naturaleza que produce el ordenamiento del movimiento del plasma en su conjunto.

El ejemplo del fluido bidimensional

Para comprender esto último, observemos la simulación artificial de semejante condición. Las gráficas de la figura 10 muestran el movimiento de un fluido bidimensional según lo describe una computadora a partir de los resultados que obtiene de las ecuaciones que describen la mecánica lineal de fluidos. (Tales soluciones de computadora son necesarias porque en realidad no hay sistemas continuos verdaderamente bidimensionales). Anteriormente, al examinar la evolución característica de un fluido tridimensional (es decir, de un fluido real), dedujimos las dos características que dominan su evolución: la cascada de energía y la aleatoriedad de fase. Un fluido bidimensional difiere únicamente en que su movimiento está restringido a una superficie plana (una película jabonosa, por ejemplo). Sin embargo, como lo muestra la figura 10, el imponer al movimiento sólo dos dimensiones cambia totalmente el comportamiento del sistema. En lugar de un vórtice relativamente grande que se deshace en pequeños vórtices de movimiento caótico, ¡las turbulencias de pequeñas dimensiones se integran en un sólo movimiento vorticular ordenado mucho más grande!

Este efecto se debe pura y sencillamente al paso de tres a dos dimensiones. Ni en tres ni en dos dimensiones difieren la atracción recíproca de los vórtices o cualquier otra interacción mecánica; simplemente, para decirlo en el lenguaje de la mecánica estadística, si limitamos el movimiento de los vórtices a dos dimensiones, es "más probable" encontrar los vórtices agrupados en estructuras coherentes que encontrarlos distribuidos aleatoriamente y con pequeñas longitudes de onda.

La segunda fila de gráficas muestra claramente que existe lo que se llama cascada inversa de energía; la energía pasa por una distribución inicial caracterizada por su difusión y valores elevados de k (pequeñas longitudes de onda), a una concentración que da valores de k pequeños (esto es, mayores longitudes de onda). Si observamos la distribución de la energía en el espacio físico, se hace evidente que la energía se encuentra en una fase

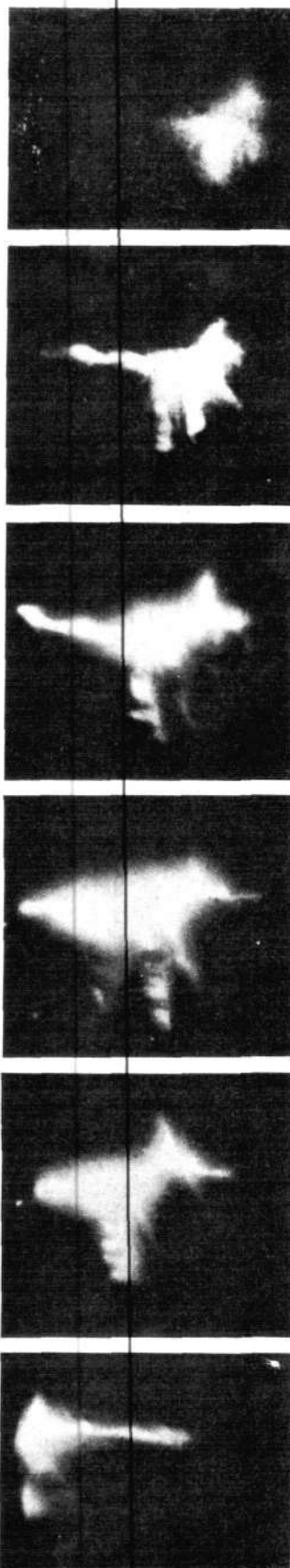


Figura 9
UN PLASMA PASANDO A TRAVÉS DE UN CAMPO MAGNÉTICO

Esta secuencia fotográfica muestra la propagación de un plasma de baja energía a través de un campo magnético de intensidad variable. El objeto visible es una pequeña porción de plasma, o plasmóide, emitida por un "cañón de plasma", que viaja a través de un campo magnético (en estas fotos, hacia el lector, en sentido perpendicular al papel), contra un fondo de plasma difuso. Incluso en el caso de estas interacciones de muy bajo contenido energético, el plasma se retuerce y forma filamentos fácilmente diferenciables que, vistos más de cerca, resultan ser vórtices de plasma. El campo magnético le da al plasma esta configuración característica a casi cualquier nivel energético.

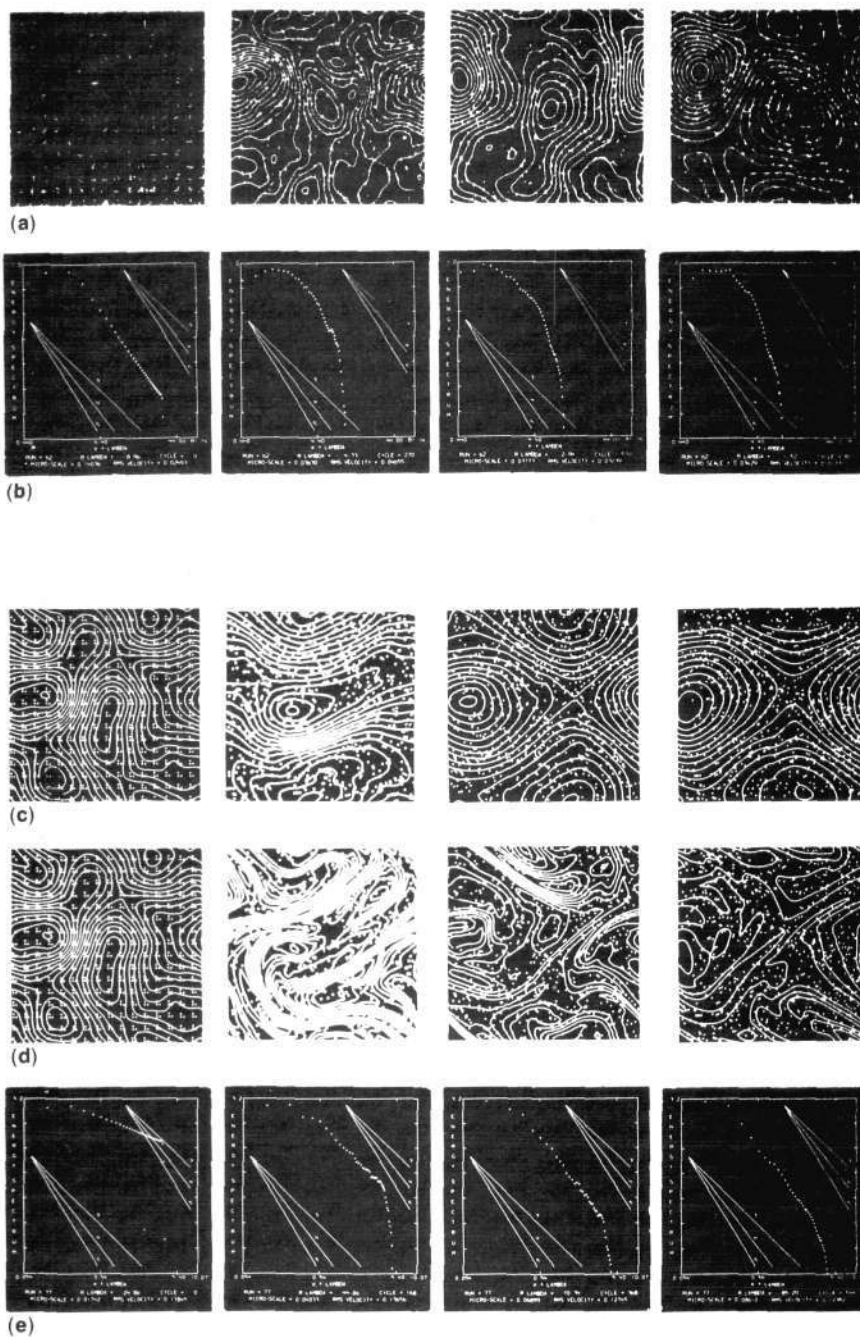
Figura 10
MOVIMIENTO
BIDIMENSIONAL DE UN
FLUIDO Y DE UN PLASMA
MAGNETIZADO

En las dos primeras series de gráficas se ve el movimiento de un fluido (a) y su espectro correspondiente (b), tal como los simula una computadora para resolver las ecuaciones clásicas que gobiernan los fluidos. Los cuadros de a son una secuencia cinematográfica simulada del movimiento de un fluido, en la cual el tiempo transcurre de izquierda a derecha. Este fluido es igual que un fluido real (tridimensional), sólo que su movimiento se confina matemáticamente a una superficie bidimensional (como una pompa de jabón). Esta restricción produce un efecto físico muy interesante; la evolución del fluido procede precisamente en dirección contraria a lo que ocurriría en un fluido tridimensional: el fluido se ordena a sí mismo. El estado inicial del fluido (extrema izquierda) es un conjunto aleatorio de turbulencia a pequeña escala; a medida que pasa el tiempo, estos movimientos minúsculos se van agregando para formar vórtices cada vez mayores, hasta que en el cuadro final se constituyen en dos grandes espirales contrarias.

El espectro b muestra el mismo efecto en términos de la transferencia de energía de pequeñas a grandes longitudes de escala (grandes a pequeños valores de k). Esto se conoce como cascada inversa.

Las últimas tres series de gráficas son el equivalente de a y b para el caso de un fluido ionizado. Las gráficas de c muestran la evolución temporal (de izquierda a derecha) del flujo del plasma; en d se aprecia el campo magnético autogenerado en los mismos momentos; y en e se representa el espectro del total de la energía del sistema (plasma más campo magnético).

Aunque son representaciones bidimensionales, estas gráficas se aproximan en gran medida al comportamiento tridimensional de un plasma; como en ellas se ve, el plasma se organiza a sí mismo, generando del caos grandes vórtices. Ya que esta correspondencia entre la solución bidimensional (idealizada) y la realidad tridimensional no ocurre en el caso de un fluido común, cabe preguntarse: ¿Cuál es la causa de que el plasma tridimensional se comporte como un fluido bidimensional?



de elevada coherencia, y que, en cada caso, se alcanza un estado final caracterizado por la presencia de dos grandes vórtices que giran en sentido contrario.

Plasmas bidimensionales magnetizados

Las gráficas de la fila *c* corresponden al movimiento del plasma y las de la fila *d* a la evolución del campo magnético generado por el plasma. Aunque, como en el ejemplo anterior, estamos presentando las cosas en dos dimensiones, el modelo se aproxima mucho a lo que sucede con un plasma en tres dimensiones. Aparecen los mismos procesos de autoordenamiento, y especialmente la tendencia de los movimientos de pequeña escala a confluir en uno de escala mayor. También aquí, en la etapa final aparecen dos vórtices grandes que giran en sentido contrario, tanto en el movimiento del plasma como en el del campo magnético. Además, la configuración plasma-campo es libre de fuerzas, puesto que el plasma no experimenta ninguna fuerza debido al campo magnético que genera, porque el flujo es siempre paralelo al campo.

No se trata tan sólo de las características de una solución de computadora; se trata de las características reales de los plasmas tridimensionales, tal como se muestra en buena medida en las fotografías de la figura 9. Lo que caracteriza la evolución de los plasmas magnetizados son las cascadas inversas de energía, los modos energéticos de coherencia de fase y las estructuras coherentes libres de fuerzas. Los estudios teóricos de soluciones de computadora como las anteriores han mostrado con suficiente claridad por qué un plasma tridimensional posee las mismas características de autoordenamiento que un fluido bidimensional: el campo magnético impone una condición a la evolución del plasma que, desde el punto de vista matemático, equivale a eliminar una de las dimensiones del sistema.

En el caso del fluido, la restricción del movimiento a dos dimensiones impone no sólo la conservación de la energía y el momento (los cuales se conservan también en tres dimensiones), sino también de la *vorticidad*, que representa la medida del grado general de torsión del flujo. Como en dos dimensiones la vorticidad no puede cambiar, los movimientos del flujo se ven restringidos, lo que da por resultado una tendencia aparentemente anormal al orden.

En el plasma tridimensional, el campo magnético introduce una nueva magnitud constante, llamada *helicidad magnética*, que representa la medida del grado general de torsión del campo y del flujo juntos. Esa cantidad habrá de permanecer constante cualesquiera que sean los movimientos del plasma. Cuando la helicidad es muy grande (es decir, la helicidad inicial del plasma es grande y así ha de permanecer, haga lo que haga), el movimiento sufre restricciones idénticas a las del movimiento bidimensional. El campo magnético surte un efecto cualitativamente similar al de la limitación del movimiento del fluido en dos dimensiones, y el plasma es forzado al autoordenamiento.

Como veremos, la evolución del plasma no se detiene en esta formación vorticular; la concentración de energía

continúa, y ocurre algo aún más extraordinario. Algo muy fuera del alcance de la física de plasmas convencional, y aún de sus ideas más avanzadas sobre la no linealidad. Si la computadora continúa resolviendo las ecuaciones por tiempo indefinido, pronosticará un lento agotamiento del movimiento del plasma y la reducción gradual del movimiento ordenado. En los plasmas reales, decididamente, no es esto lo que ocurre. Su comportamiento real rebasa los límites de cualquier descripción teórica que pueda ofrecer una física matemática incapaz de predecir desde fuera un cambio cualitativo del sistema.

Sin embargo, la formación de estas estructuras vorticales libres de fuerzas nos da una importante indicación del proceso fundamental subyacente de evolución nega-toentrópica, y por esta razón merece un estudio más profundo.

Por analogía con la formación de solitones a partir de estados no lineales de una onda del plasma, se puede suponer que los estados no lineales de una onda de Alfvén guardan relación con la formación de vórtices. Y así es. El examen cuidadoso de las propiedades ondulatorias de los vórtices demuestra que son, en efecto, la fase no lineal de la onda de Alfvén lineal.

El indicio más importante de esta relación son las características geométricas básicas de una onda de Alfvén. Como lo señalamos anteriormente, la onda de Alfvén es una pequeña perturbación periódica del campo magnético, la cual origina una oscilación en torno a la línea de campo, aún cuando el plasma se mantiene adherido a las líneas de campo. Parte de la energía de la onda se manifiesta como un pequeño campo magnético perpendicular al campo original, pero paralelo al desplazamiento de las líneas de campo. Mientras la magnitud de este campo autogenerado sea pequeña respecto al campo original, tenemos una onda de Alfvén lineal. La característica común más importante de la onda de Alfvén es que es una oscilación libre de fuerzas, por cuanto el campo magnético que origina la onda (la pequeña perturbación) es paralelo al movimiento del plasma. Dado que la velocidad y el campo magnético son paralelos, no hay fuerza de Lorentz (la fuerza magnética que experimenta una partícula cuando atraviesa perpendicularmente un campo magnético).

Este fenómeno es estrictamente un movimiento colectivo del plasma. El movimiento de cualquier carga siempre genera un campo magnético perpendicular a su propio movimiento; pero cuando el plasma en su conjunto genera un campo magnético éste es paralelo al movimiento del plasma! Lo mismo sucede con los vórtices descritos anteriormente, y ello es el mejor indicio de que son estados no lineales de una onda de Alfvén. Sin embargo, resulta difícil aplicar la expresión "onda de Alfvén" a este fenómeno, toda vez que ya no satisface los supuestos que definen una onda de Alfvén. La perturbación del campo magnético, es decir el campo autogenerado, es tanto o más grande que el campo original, y el campo magnético original ya no gobierna ni las órbitas de cada partícula ni al plasma en su conjunto. De hecho, la formación de vórtices permite al plasma "escaparse" de un campo

magnético suficientemente intenso, en apariencia, para confinar su movimiento.

La conclusión que se desprende de lo anterior es más bien sorprendente. Aunque la física clásica (lineal) de plasmas predice que un campo magnético fuerte confinará al plasma y evitará que se mueva en dirección perpendicular al propio campo, el plasma encuentra la forma de generar su propio campo magnético en la forma de anillos y filamentos vorticiales, que luego utiliza para "difundirse" a través del campo magnético a su voluntad. Este es un fenómeno experimental bien conocido, llamado "difusión anómala", aunque pocos físicos de plasma reconocen la función que desempeña el movimiento vorticular en el fenómeno. Realmente ni es difusión ni es anómala, sino que es la autoconcentración ordenada del plasma y el campo magnético en una estructura libre de fuerzas.

Plasmas de alta energía

Con este instrumental podemos pasar a examinar la evolución completa de un plasma de alta energía que atraviesa un campo magnético. Es indispensable insistir en que los conceptos de la física en su condición presente son tan sólo guías que nos acercan a la comprensión del comportamiento real del plasma, y muchas veces proveen más información cuando no logran explicar un fenómeno, que cuando logran hacerlo.

Los plasmas reales pasan por muchos regímenes de energía en el curso de su evolución natural, y cada uno de estos es cualitativamente distinto de los que le anteceden. Los conceptos adecuados a cualquiera de esas etapas carecen de importancia en sí y por sí; importan sólo en cuanto aportan elementos útiles para explicar la transición de una etapa a otra. La tarea más importante que enfrenta la física de plasmas es valerse de los conceptos derivados de la observación de los fenómenos de autoordenamiento de cualquier régimen dado para comprender la transición del plasma a un nuevo régimen donde estos mismos conceptos necesariamente resultarán inaplicables.

Los aspectos más críticos del comportamiento de los plasmas al atravesar un campo magnético son evidentes sólo por implicación en los experimentos de baja energía descritos con anterioridad, puesto que la solución de computadora que aparece en la figura 10 y los resultados experimentales mostrados en la figura 9, así como las herramientas conceptuales de la onda de Alfvén no lineal y el vórtice libre de fuerzas, corresponden a un sólo régimen energético.

El experimento presentado en la figura 8 (b) hace casi ineludibles esas consecuencias. El sistema de enfoque de plasmas reproduce en esencia el mismo experimento que se describe en la figura 8 (esquema a), salvo que la energía del plasma es mucho mayor. En un sistema de enfoque de plasmas, el campo magnético envuelve el conductor central y el plasma se mueve entre los dos conductores concéntricos. Es también un experimento en el que el plasma se mueve perpendicularmente respecto al campo magnético que se le aplica desde fuera, sólo que la configuración es cilíndrica. Para poner en marcha el ex-

perimento, se envía una descarga eléctrica repentina desde el condensador a los electrodos del aparato. Cuando el voltaje es lo suficientemente elevado (dependiendo del tipo de gas que llena el espacio entre los cilindros), el gas se ioniza; es decir, los electrones se separan de los núcleos y se forma el plasma. Este plasma inicial es una masa amorfa en el extremo posterior del aparato. El plasma interactúa con el campo magnético que rodea el electrodo central y es impulsado a lo largo del aparato, hacia los extremos de los electrodos.

Entonces empieza lo más interesante. El plasma no avanza por el aparato como una masa homogénea, sino que primero forma una película muy delgada, como la superficie curva de una burbuja de jabón que fuera soplada por el espacio anular que dejan entre sí los electrodos. Esta vaina de plasma, sumamente delgada y uniforme, que constituye el primer paso de la autoconcentración de la energía del plasma, es de muy corta duración, puesto que rápidamente se perturba y empieza a rizarse, y ¡en el diente de cada rizo el plasma se enrolla formando un filamento!

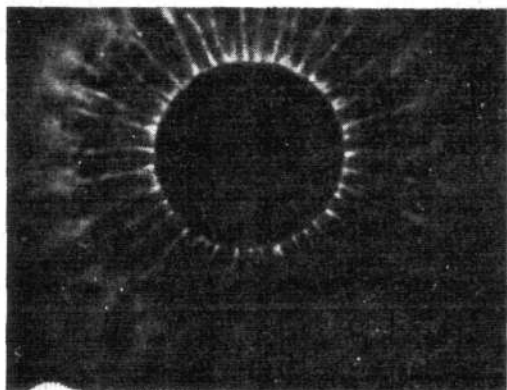
Este momento de la evolución del plasma es, por muchas razones, el más interesante. De un plasma original completamente desordenado se ha formado un plasma ordenado en finos filamentos enrollados, cada uno de los cuales presenta una compleja estructura interna.

En la figura 11 aparecen fotografías de los filamentos del plasma y un diagrama de su estructura interna hipotética. Hay muchas cosas realmente sorprendentes en estos filamentos. Primero, desde el punto de vista puramente cuantitativo, la densidad energética de los filamentos del plasma es miles de veces mayor que la del plasma inicial. La evolución espontánea del plasma ha generado por sí misma una tremenda "granulación" del plasma, que nos recuerda de inmediato la formación de solitones.

Segundo, los filamentos no se forman al azar ni se comportan como fenómenos aislados entre sí. Tal como lo muestran claramente las fotografías, los filamentos se distribuyen en pares, y las mediciones más finas indican que los filamentos de cada par giran en sentidos contrarios, según el esquema b de la figura 11. Cada filamento está formado por campos magnéticos y corrientes de plasma firmemente entrelazados, y cada vez más definitivamente alineados hacia el centro del filamento.

Más todavía: se trata de un acomodo de corrientes y campos libres de fuerzas. Puesto que el campo magnético del filamento, campo magnético autogenerado, es en todas sus partes paralelo a la velocidad del plasma, el filamento es una configuración libre de la fuerza de Lorentz. Su semejanza con los vórtices generados por computadora (figura 10) es sorprendente. En ambos casos nos encontramos ante una tendencia a la formación de estructuras que del desorden inicial adquieren cada vez mayor orden; es decir, se observa una cascada inversa de energía y procesos de coherencia de fase. En ambos casos se forma una estructura de movimiento libre de fuerzas con pares de vórtices que giran en sentidos contrarios.

Comparemos ese comportamiento con lo que sucede normalmente cuando introducimos energía en un sistema.



(a)



(b)

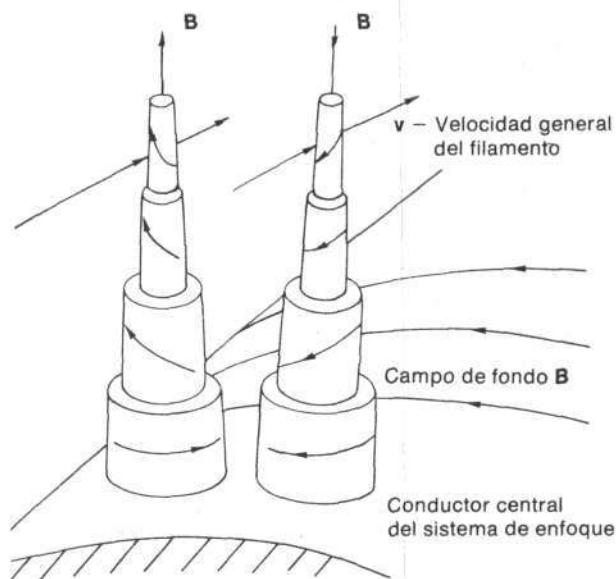


Figura 11

EVOLUCIÓN DE UNA VAINA DE PLASMA EN UN DISPOSITIVO DE ENFOQUE DE PLASMA

La fotografía de la primera fase en la evolución de una vaina de plasma dentro de un dispositivo de enfoque de plasma (izquierda) muestra los filamentos de plasma ya formados. Obsérvese que los filamentos ocurren en parejas y que algunos de ellos ya se han comenzado a deshilar en los extremos exteriores. En una fotografía tomada después (derecha), la vaina se ha comenzado a desprender del electrodo y se va concentrando en el foco. Muchos científicos han aventurado conjeturas sobre la compleja estructura de la vaina, pero sus detalles son todavía un misterio.

En el diagrama **b** se aprecia un par de filamentos vorticiares de plasma como los fotografiados en **a**. El campo magnético y la velocidad local del plasma son siempre paralelos, de manera que los filamentos están libres de fuerza. Obsérvese que la configuración general es la de un plasma que se mueve en sentido transversal al campo magnético, ya que el campo externo se nutre del campo magnético que rodea el electrodo interno. El plasma del filamento se retuerce en el mismo sentido que el campo **B**.

Para calentar un cuarto frío aprovechamos la propiedad de los gases de difundir muy rápidamente la energía que se les aplica, y el hecho de que en un gas el calor se distribuye completamente al azar, por todo el gas. En el foco de plasma las cosas son muy distintas. Es como si uno encendiera el calentador de un cuarto y el aparato súbitamente arrojara no sólo corrientes de aire caliente sino también chorros de hierro fundido del calentador. Y si además el aire del cuarto concentrara espontáneamente la energía por un factor de mil, como sucede en el foco de plasma, estaríamos en apuros.

Los filamentos del plasma se siguen estrechando y se vuelven cada vez más intensos, más calientes y más concentrados conforme el plasma avanza entre los electrodos. En ciertos momentos los filamentos se deshilaran un

poco (como puede verse en los cabos de algunos filamentos en la figura 11), y ocasionalmente se cruzan y se eliminan mutuamente. No obstante, por lo general se desplazan sin impedimento hasta el final del aparato. Cuando llegan al final de los electrodos es que empieza lo bueno.

El sistema de enfoque se diseñó para aprovechar las fuerzas propias de los plasmas, las cuales tienden a formar con él una especie de nudo apretado en el extremo del electrodo interno.

La figura 11 también muestra fotografías de esta etapa del enfoque. A medida que los filamentos del plasma abandonan el electrodo interno, entran en un proceso de eliminación mutua y regeneración. Todo el proceso ocurre en menos de una millonésima de segundo, desde que

se forman los filamentos hasta que se vuelven a formar, formándose un nódulo firme de plasma en el extremo de la máquina. Todavía se investiga la estructura exacta de este nódulo, pero parece ser una aglomeración de filamentos de orden superior, como una especie de ovillo.

Pasando por alto la estructura interna del nódulo, los resultados macroscópicos de la destrucción y reestructuración de los filamentos se conocen bien. Los intensos campos magnéticos del filamento generan haces de iones concentrados y altamente energéticos en el plasma. Estos haces de iones de deuterio (cuando se utiliza este gas para llenar el aparato de enfoque) alcanzan una temperatura de 350 millones de grados. Estos haces de partículas están altamente localizados, y ocurren cada vez que se descarga el aparato.

El efecto de los haces en el plasma es igualmente sorprendente: se produce fusión nuclear. Los iones de deuterio de estos haces chocan con iones del plasma inicial de deuterio, fundiéndose para formar helio y tritio en una serie de reacciones de fusión. De hecho, de todos los dispositivos de fusión de plasmas, el aparato de enfoque sigue siendo el más prolífico productor de neutrones por fusión.

Los neutrones observados en el dispositivo de enfoque son producto de la siguiente secuencia de hechos: la autoconcentración del plasma en la vaina de plasma; la formación de filamentos; la aceleración de los haces de iones fruto de esa eliminación de filamentos; y la fusión de haces de partículas cuando colisionan con otros iones de deuterio. De ninguna manera se trata de un proceso en equilibrio térmico; cada paso requiere de estructuras autoorganizadas y de elevada no linealidad para almacenar la energía necesaria y producir el grado de densificación requerido. De hecho, para la mayoría de los físicos de plasmas, el origen no térmico de los electrones (cuya presencia hay que medir como tal y no presuponer que se entiende su origen en la destrucción de filamentos) eliminó al dispositivo de enfoque de plasmas como aspirante al puesto de equipo productor de energía mediante fusión nuclear. ¿La razón? Si la producción de neutrones del aparato no proviene de un plasma térmico en equilibrio entonces no es digna de confianza; no es termonuclear. Más todavía: pertenece a esa extraña y poco recomendable familia de los fenómenos no lineales.

Sin embargo, y al margen de lo que piense uno al respecto, la tendencia natural del plasma parece ser la concentración de energía, y el resultado final "natural" de este proceso es la fusión. El plasma parece irse por sí mismo hacia la fusión.

Algunas conclusiones

Para examinar la evolución de un plasma en un foco de plasma se necesita una visión más global de su proceso de desarrollo que la que brindan las herramientas teóricas de la física de plasmas descritas anteriormente. No basta describir tan sólo las fuerzas locales que inciden sobre el plasma a cada momento de su proceso de desarrollo; tiene que haber un hilo que los conecta todos. En el caso de la formación de solitones no se podía resolver este

problema, puesto que en ese caso sólo hay una "etapa" cuyas características reales se pueden obtener experimentalmente. No obstante, la pregunta ¿qué es lo que "impulsa" la evolución del plasma? exige respuesta. En el caso del foco de plasma hay más preguntas todavía. Muchos físicos han inscrito este problema dentro de los confines del problema específico de dar cuenta de los filamentos de plasma que se forman en una vaina de plasma. Este proceso de "enrollamiento" del plasma no se puede descartar (como lo hacen muchos físicos) simplemente afirmando que una cierta "inestabilidad" —que llaman *inestabilidad cortante* o *modo cortante*— da lugar a la desintegración de la vaina uniforme. Esto no basta, ni cualitativa ni cuantitativamente.

Un grupo de físicos dirigido por el doctor Dan Wells, de la Universidad de Miami, ha encontrado un camino más prometedor a la solución de este problema. El grupo de Wells ha usado un modelo de plasma completamente fluido (es decir, considerando las partículas como si se difundieran y sólo respondieran en unisono a las fuerzas del campo magnético, también fluidas) y han aplicado este modelo al problema de un plasma que se mueve a través de un campo magnético externo.

Este enfoque magnetohidrodinámico ha rendido varias observaciones importantes. La primera y la más extraordinaria es que el plasma cambia su configuración interna y externa a fin de reducir al mínimo el índice de energía libre o disponible; en otras palabras, el comportamiento global del plasma es tal que su eficiencia es siempre máxima con respecto de la energía que contiene. Dentro del marco de la magnetohidrodinámica, los movimientos posibles del plasma están limitados por el hecho de que es imposible cambiar el valor de ciertas magnitudes, como se hizo en el estudio computarizado de fluidos y plasmas bidimensionales. La energía, el número de partículas y la helicidad magnética, por ejemplo, no son susceptibles de modificación. En el caso de un plasma que se mueve a través de un campo magnético, cuando se aplican estas restricciones al mismo tiempo que se reduce al mínimo la energía disponible, el movimiento más eficiente posible es la formación de ondas de Alfvén no lineales (en forma de filamentos vorticiales). Estos filamentos pueden adoptar varias formas, según la configuración del plasma, pero la "necesidad" general que rige en esta teoría es la formación de la misma clase de filamentos que se observa en el foco de plasma. Esta teoría predice además que éstos deben ser filamentos sin fuerza (es decir, que el movimiento del plasma es paralelo al campo magnético auto-creado).

Adviértase lo que ha demostrado Wells. La magnetohidrodinámica parte de una imagen global del plasma; es decir, no se le considera como una colección de partículas cargadas. Además, la dinámica toma como punto de partida al plasma como un todo; la fuente de todos sus campos es el movimiento del plasma en su conjunto, no sus partículas individuales. Dentro de esta geometría física fija, el plasma actúa para minimizar un parámetro estricto de energía excedente, y en conformidad a este requerimiento estricto, forma un equilibrio metaestable altamen-

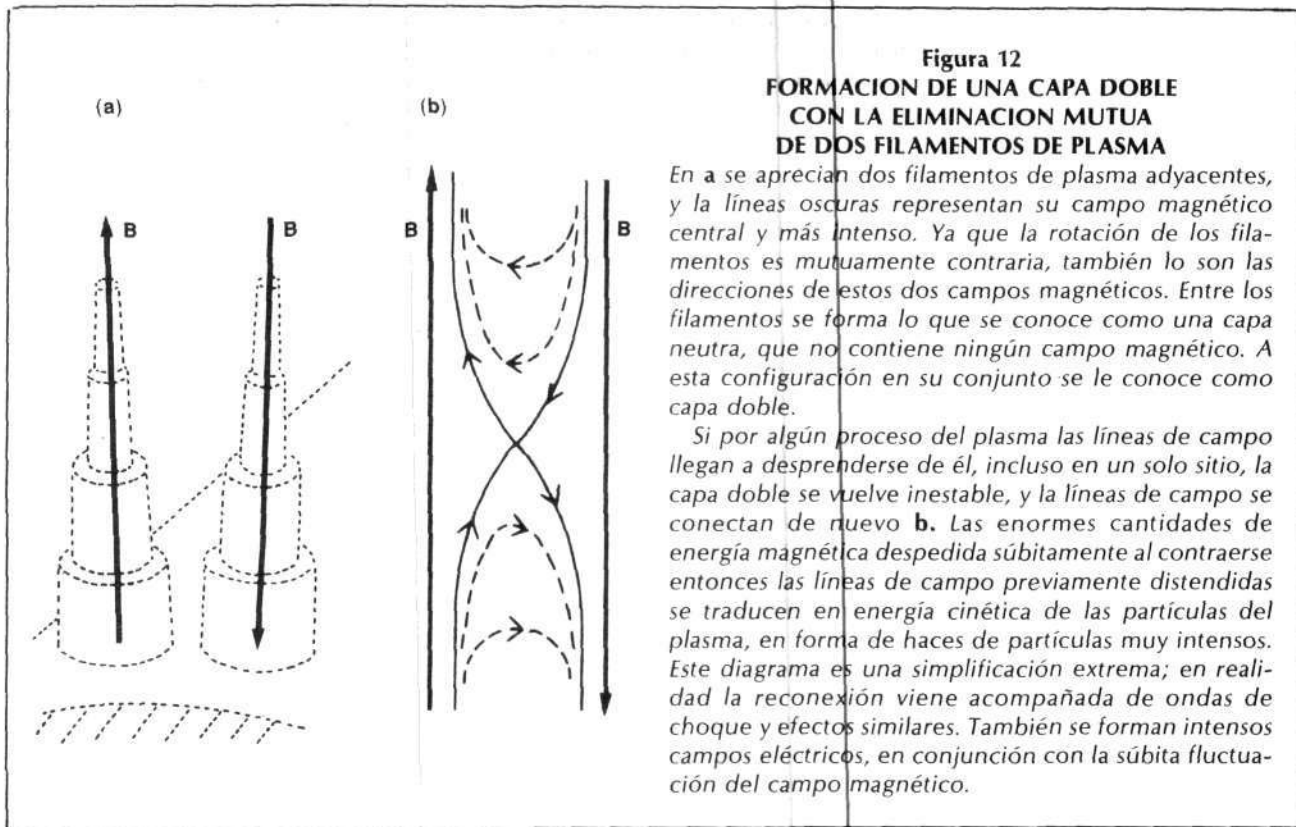


Figura 12
FORMACION DE UNA CAPA DOBLE
CON LA ELIMINACION MUTUA
DE DOS FILAMENTOS DE PLASMA

En **a** se aprecian dos filamentos de plasma adyacentes, y la líneas oscuras representan su campo magnético central y más intenso. Ya que la rotación de los filamentos es mutuamente contraria, también lo son las direcciones de estos dos campos magnéticos. Entre los filamentos se forma lo que se conoce como una capa neutra, que no contiene ningún campo magnético. A esta configuración en su conjunto se le conoce como capa doble.

Si por algún proceso del plasma las líneas de campo llegan a desprenderse de él, incluso en un solo sitio, la capa doble se vuelve inestable, y la líneas de campo se conectan de nuevo **b**. Las enormes cantidades de energía magnética despedida súbitamente al contraerse entonces las líneas de campo previamente distendidas se traducen en energía cinética de las partículas del plasma, en forma de haces de partículas muy intensos. Este diagrama es una simplificación extrema; en realidad la reconexión viene acompañada de ondas de choque y efectos similares. También se forman intensos campos eléctricos, en conjunción con la súbita fluctuación del campo magnético.

estructurado. Este metaequilibrio, como hemos visto, proviene de una cascada inversa de energía y de fases no aleatorias.

El trabajo de Wells lo llevó más adelante David Montgomery, investigador de la Universidad William and Mary y del laboratorio de Los Alamos, quien demostró que el criterio empleado por Wells para realizar este cálculo implicaba algo mucho más profundo. Wells había especificado que la energía se tenía que minimizar conforme a las restricciones del problema, pero Montgomery observó que la energía y la helicidad magnética, las dos restricciones principales, no son de carácter equivalente. Demostró que la energía sí tiene en efecto una tendencia a decrecer (a causa de diversos efectos entrópicos), mientras que la helicidad magnética es constante.

Además, en esta situación, la helicidad magnética mide precisamente el grado al cual el plasma forma estructuras libres de fuerza a gran escala. En otras palabras, Montgomery mostró que la evolución del plasma está gobernada por un principio que requiere un máximo de estructura coherente macroscópica en el movimiento del plasma. El significado de los extraordinarios efectos introducidos por un campo magnético (mencionados anteriormente) se puede reducir a esta asombrosa implicación cualitativa de la helicidad magnética.

Con todo y su sofisticación respecto de las representaciones del movimiento de un plasma en base a la interacción de partículas, este modelo se basa en una geometría fija de interacción física, y todo lo que haga el plasma debe permanecer dentro de esa geometría. Mientras el

plasma se ajuste a estos preceptos en la realidad, disponemos de un medio muy eficaz para pronosticar sus movimientos y para comprender su comportamiento en un nivel profundo. Mas esta geometría, como cualquier geometría fija, es inestable; el plasma hace cosas que le obligan a salirse de ese marco.

Esto se pone de manifiesto específicamente en el caso del foco de plasma, aún más que en la formación de solitones. La pregunta obvia que resulta de comparar el trabajo teórico de Wells y los experimentos de Bostick es ¿por qué se eliminan mutuamente los filamentos? Aunque los detalles empíricos de este proceso no están claramente definidos, hay ciertas cosas básicas que se pueden decir en respuesta a esta pregunta.

Considérese la configuración formada por los pares de filamentos adyacentes de rotación contraria, llamada capa doble (ilustrada esquemáticamente en la figura 12). Se trata de dos regiones adyacentes de campos magnéticos intensos de dirección contraria. La región del plasma que las separa se llama la capa neutra. Esta configuración de capa doble ocurre también en muchos otros plasmas, como en la región donde el campo magnético que acompaña el plasma emitido constantemente por el sol (viento solar) choca con el campo magnético de la Tierra. Allí este fenómeno cobra dimensiones espectaculares.

La magnetohidrodinámica puede describir esta capa doble y sus filamentos circundantes en términos de la configuración del campo magnético mostrada en la figura 12. El campo magnético es la única fuerza que se necesita para formular el problema. En la vida real, sin embargo,

la capa doble no es tan sencilla. Recuérdese que las líneas del campo magnético se pueden considerar como si estuvieran bajo tensión; están estiradas todo el tiempo. Si ocurre en el plasma algún proceso que le permita a las líneas de campo moverse a través del plasma (con la excepción del plasma que se adhiere a las líneas de campo, independientemente de su movimiento) entonces las líneas se pueden romper y volverse a conectar.

Mientras el plasma sea un conductor perfecto (o lo que es igual en la mayoría de las circunstancias, mientras no haya choques entre las partículas), las líneas se fijan en el plasma, y la capa doble puede existir indefinidamente. Imagínese lo que sucedería si dos líneas de campo vecinas, de direcciones contrarias, cruzaran la capa neutra e hicieran contacto, reconectándose. Puesto que ambas están "estiradas", inmediatamente saltarían hacia arriba y hacia abajo como despedidas de una catapulta doble. Esta secuencia hipotética aparece en los diagramas de la figura 12. Esto es lo que sucede en las capas dobles, a *grosso modo*: son inestables, y descargan en un sólo episodio de reconexión violenta toda la energía magnética que han acumulado.

Desde el punto de vista de la partícula del plasma, la reconexión de estas líneas de campo es toda una hecatombe. En primer lugar, aún desde el punto de vista de la magnetohidrodinámica elemental, cabría esperar que las partículas de la región de reconexión sufrieran efectos violentos, puesto que saldrían disparadas de esa región junto con las líneas de campo que se reconectan. Efectivamente, eso pasa, pero lo más importante es que también cambia el carácter cualitativo del sistema. En la magnetohidrodinámica, el único campo electromagnético necesario es el campo puramente magnético. No obstante, las mismas consideraciones clásicas que dieron lugar a la magnetohidrodinámica dejan claro que cuando el campo magnético cambia tan rápidamente, se debe considerar también en las ecuaciones el campo eléctrico. Los cambios rápidos causados en el campo magnético por la reconexión violenta de las líneas de campo generan un intenso campo eléctrico. Este campo eléctrico saca volando entonces a las partículas. El campo eléctrico, que se concentra en el lugar de reconexión, acelera intensos rayos de iones de deuterio, y éstos ocasionan la fusión en el foco de plasma.

El papel de la singularidad

Tan pronto como empieza la reconexión de las líneas de campo, la cualidad global de las interacciones dominantes en el plasma se transforma. La geometría mínima, apacible, de la magnetohidrodinámica se parte, como cuando se le pone un alfiler a una membrana de caucho bien estirada. Como quedó claro en el caso de la formación de solitones y en el problema del electrón en la electrodinámica clásica, la introducción de singularidades en un continuo como la magnetohidrodinámica transforma fundamentalmente el carácter de ese continuo. En realidad, la singularidad precipita la transición a una nueva geometría; es el germen de un estado cualitativamente nuevo en la evolución del sistema.

Este tanto podía saberse a partir del caso relativamente sencillo del solitón, pero ahora se sabe mucho más sobre los detalles de la transición. Primero, no es el carácter topológico de la reconexión de líneas lo que le convierte en una singularidad. La magnetohidrodinámica podría comprender (y comprende) un sinnúmero de reconexiones de línea y cambios topológicos de sus campos magnéticos. La transformación topológica, empero, aunque es el rasgo más notorio del problema, es necesaria, mas no basta para inducir la clase de cambios que ocurren en el plasma como un todo, cambios tan violentos que transforman el tipo de partículas que componen el plasma!

La singularidad de la reconexión de líneas introduce al plasma en ese punto de singularidad topológica una interacción cualitativamente nueva: el campo eléctrico. En un medio geométrico autoconsistente y autocontenido (la superficie mínima de la magnetohidrodinámica), el plasma crea de repente una interacción que ni siquiera tiene lugar en la geometría de la dinámica de energía mínima. En realidad, el instante de la reconexión de las líneas del campo magnético no existe en el mismo universo que el resto del plasma. Forma parte ya de la geometría nueva en la cual pronto entrará el resto del plasma: una geometría caracterizada por campos eléctricos de alta energía, haces de partículas y fusión nuclear.

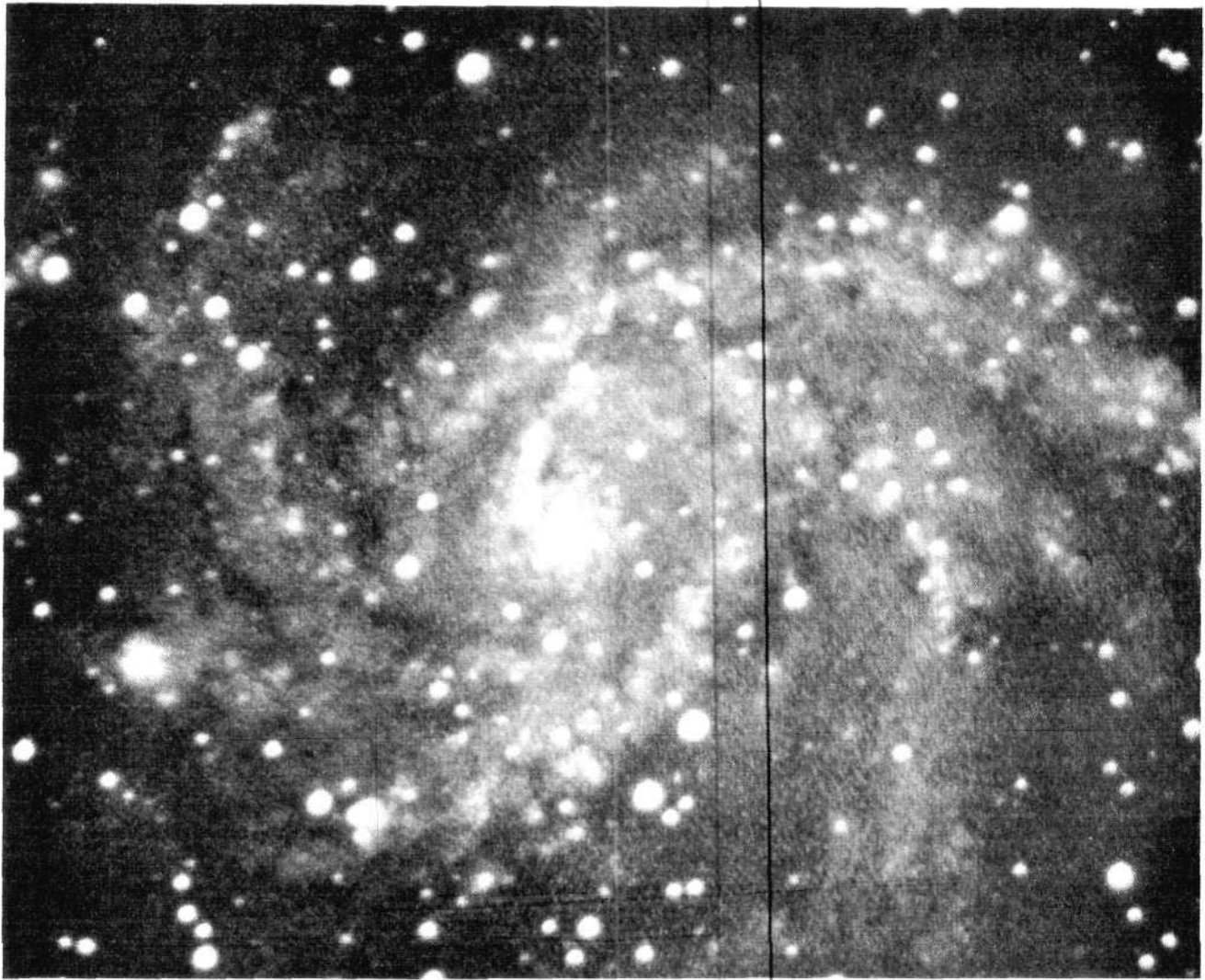
La singularidad no es un simple puntito; es cualitativamente diferente del resto de la multiplicidad. Aunque ha resultado de la evolución natural (y determinística) del sistema que le dio a luz, introduce en ese sistema una nueva serie de interacciones inconmensurables. Estas interacciones cualitativamente nuevas alteran el curso evolutivo del sistema en una forma que no podría determinarse determinísticamente a partir del viejo sistema. Esta es la realidad empírica, no sólo en el caso del plasma antes descrito, sino en todos los procesos fundamentales del universo: son negatoentrópicos. Tanto la superfluidez y los plasmas como el hombre mismo manifiestan esta cualidad de la evolución.

La física de plasmas hace accesible esta cualidad fundamental del universo como no lo puede hacer ninguna otra disciplina experimental. Con la evidencia experimental acumulada hasta la fecha, el experimento del foco de plasma le permite a los investigadores desentrañar varios principios mecánicos de esta evolución negatoentrópica, a saber:

(1) El hecho elemental que debe concluirse es que cualquier conjunto fijo de leyes físicas es inadecuado. Un plasma evoluciona rápidamente de un régimen a otro, cada uno de los cuales es distinto del anterior. Los dos experimentos que hemos examinado muestran con la mayor claridad esta característica general.

(2) Este proceso global de evolución ocurre en una forma discontinua; en otras palabras, el sistema salta de un estado al siguiente en una serie de transiciones violentas.

(3) Se pueden construir modelos más o menos representativos de cada uno de estos estados en base a una serie fija de leyes determinísticas, pero el proceso global no se puede explicar de esa manera. La idea común de



Más que simplemente no entrópicas, se entenderá que las características autoorganizativas de los plasmas son verdaderamente negatoentrópicas cuando se aclare la historia del universo como un proceso de evolución de plasmas. En nuestros días, el tipo de efectos no lineales que los investigadores han encontrado en los plasmas no son ya la determinante del desarrollo del universo; la evolución del hombre, por ejemplo, ocurre ahora con rapidez mucho mayor. En algún momento del pasado, sin embargo, la misma clase de efectos no lineales que se observan hoy en los plasmas de laboratorio ha de haber ocasionado los fenómenos que devinieron finalmente en la Tierra y todos sus habitantes. Una vez comprendida desde este punto de vista histórico la física de plasmas —fenómenos inorgánicos— nos es posible abordar la cuestión de la coherencia de los procesos físicos, biológicos y humanos.

causalidad determinista es suficiente para comprender una buena parte de la física comprendida dentro de una geometría específica, pero falla totalmente cuando se trata de la transición de una geometría a otra.

(4) Los problemas inmediatos más difíciles de resolver en la física de plasmas contemporánea se deben a las singularidades cuya importancia es central en el proceso global de evolución negatoentrópica. Específicamente, ¿cómo hacen estas singularidades para trascender la geometría que las crea e inducir una geometría nueva? Y ¿cómo es posible que una geometría determinada dé lugar a un proceso cuyo resultado es una nueva geometría cualitativamente diferente de sí?

Obviamente, la singularidad es la clave del problema. No nos podemos contentar, sin embargo, con el hecho general de que existen; debemos obtener una descripción particular, rigurosa, de cómo inducen transiciones de una geometría a otra. El rasgo más evidente en el curso general de esta evolución del plasma (así como de otras manifestaciones) es la tendencia a la concentración de energía. Recuérdense los experimentos con plasmas donde el solitón y los filamentos que se desintegran se distinguieron inmediatamente por sus concentraciones de energía autocreadas. El porqué de estas concentraciones de energía tiene que estar estrechamente ligado a su función como singularidades.

Como hemos visto, lo que no se comprende todavía acerca de esta energía es su papel determinante (o mejor, creador) de posibilidades evolutivas en un sistema dado. Los medios de esta creación son las singularidades, y la cualidad única de la singularidad ¡es su densidad energética! En general, la densidad energética refleja la velocidad evolutiva que el sistema es capaz de mantener. La singularidad cataliza la transformación evolutiva, porque introduce una nueva velocidad, y por consiguiente una nueva cualidad de la evolución. En el caso del solitón y el filamento, por ejemplo, se presentó una concentración local de energía que, en virtud de esa densidad energética, inició una nueva serie de procesos plasmáticos caracterizados por una energía más alta (es decir, fusión). Estos nuevos procesos son también mucho más veloces que sus predecesores.

(5) La estrecha interrelación entre la cualidad de interacción y la densidad energética expresa su más profundo significado en el caso de la singularidad. Debido a su densidad energética superior, la singularidad tiene las propiedades evolutivas (métrica del tiempo) de la multiplicidad que sigue, propiedades que trae a la multiplicidad anterior, y en haciéndolo introduce en el conjunto de dicha multiplicidad esta nueva métrica del tiempo, transformándola cualitativamente de este modo específico. Por esto es que no se puede ubicar a la singularidad dentro de la multiplicidad a la cual parece pertenecer; aunque posee las cualidades espaciales de esa geometría, debido a su densidad energética forma parte de un mundo temporal diferente.

El logro más significativo de la física del siglo XX fue cuando se llegó a un entendimiento relativista del espacio a partir de la idea riemanniana de relatividad, a saber: que la propia masa de energía es a la vez la causa y la estructura del espacio que habita. El tiempo también es relativo; relativo a los procesos que ocurren "en él". El tiempo y la densidad energética, sin embargo, están estrechamente interrelacionados: la singularidad es el nudo que los une.

(6) Estas consideraciones también ponen de manifiesto de una manera más precisa el significado de los fenómenos autoordenados en general. La característica más extraordinaria de casi todos los procesos físicos —la que viola todo lo que dictaría inicialmente el sentido común en cuanto al desorden espontáneo prescrito por la segunda ley de la termodinámica— no se puede descubrir del estudio de las estructuras en sí mismas. Más bien, como lo demuestra la formación de los filamentos vorticiales en un foco de plasma, estas estructuras son los medios de los que se vale una geometría para superarse a sí misma.

Estas estructuras son significativas porque son capaces de generar una singularidad de su propia densidad energética en crecimiento. Considérese el embrión de un polluelo, que con toda seguridad es uno de los más admirables fenómenos autoordenados. Una pequeña parte del pico del embrión toma la forma de un diente, o "diamante", que solo dura unos días, durante los cuales el polluelo se vale de él para cortar el cascarón y efectuar su salida al mundo. Las estructuras autoordenadas del plasma son los "diamantes" que emplea el plasma para

emerger de geometrías que le van quedando pequeñas.

(7) Finalmente, hay que entender qué es lo que guía al plasma de una geometría a otra. ¿Cómo "sabe" el plasma dónde saltar (y caer parado) cuando efectúa un salto discontinuo de una multiplicidad a otra? ¿Cuál es la invariante que reemplaza a una causalidad determinística, que sirve de puente natural no determinístico entre las multiplicidades?

La física de plasmas no puede responder las partes más difíciles de estas preguntas en el laboratorio, a menos que el laboratorio sea la astrofísica de plasmas, ya que éste es el lugar donde la física de plasmas desempeñó por sí misma su función histórica como un estado de la evolución del universo. En algún momento del pasado, el universo tuvo que ser un inmenso plasma. En última instancia, le debemos nuestra existencia a ese plasma.

Al presente, podemos al menos describir el rasgo invariante de esta evolución negatoentrópica en dos sentidos. Primero, aún en la pequeña porción de la evolución del plasma que nos es dado conocer en los experimentos de laboratorio, cada estado de evolución se caracteriza porque da lugar a estados más avanzados, con densidad energética superior, mayores velocidades evolutivas y una autoextinción más rápida en favor de un nuevo estado posterior. La sucesión de geometrías no es una simple procesión lineal; éstas avanzan en una clara progresión de lo simple a lo complejo. Además, dondequiera que se detenga la evolución, el sistema entero deviene caótico.

Segundo, el sentido en el cual la física de plasmas verdaderamente esclarece la evolución negatoentrópica sólo se vino a entender por el año 1978, 10,000 millones de años después de la era del plasma. Debería quedar muy claro por qué se presenta hoy esta ocasión. La física de plasmas, especialmente en el dominio de la energía de fusión, es la clave de la próxima fase de la evolución de la humanidad. Si falláremos en el dominio de sus secretos, no sobreviviremos. Si lograremos someterle a nuestros propósitos, abriremos una posibilidad única de progreso inimaginable.

El doctor Steven Bardwell es director de investigaciones en física de plasmas de la Fusion Energy Foundation.

Bibliografía

- Bardwell, S. 1976. "History of the Theory and Observation of Ordered Phenomena in Magnetized Plasmas". *FEF Newsletter* (sept.).
- Bezerides, B. y DuBois, D. 1976. *Physics Review Letter* 36:729.
- Boley, F. 1966. *Plasmas—Laboratory and Cosmic* (Princeton, N.J.: Van Nostrand).
- Bostick, W. 1977. "The Pinch Effect Revisited". *International Journal of Fusion Energy*. Vol. 1, pág. 1 (marzo).
- Grad, H. 1978. "Magnetic Confinement Fusion Energy Research". *International Journal of Fusion Energy*. Vol. 2, pág. 1 (verano).
- Montgomery, D. 1978. *Physics of Fluids*. 21:757.
- Morales, B. y Lee, Y. 1976. *Physics of Fluids*. 19:690.
- Quon, B. H., Wong, A. Y. y Ripin, B. H. 1974. *Physics Review Letter*. 32:406.
- Tsyтович, V. M. 1976. *Physica C*. 82:141.
- Wells, D. y Ziajka, P. 1978. "Production of Fusion Energy by Vortex Structure Compression". *International Journal of Fusion Energy*, Vol. 1, #3,4, pág. 3 (invierno).
- Wong, A. Y. y Quon, B. H. 1974. *Physics Review Letter*. 34:1499.

Comentario

NOTA DE LA REDACCION

El autor de este comentario, Luis Fernando Calviño, es director de la revista bonaerense Energeia y activo promotor del programa nuclear de Argentina. Es asimismo miembro del Partido Justicialista, fundado por el general Juan Domingo Perón, y miembro fundador del Club de la Vida. Escribió su comentario antes de las recién celebradas elecciones presidenciales argentinas.

Al momento de escribir estas líneas, el presidente de la Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA, señor Carlos Castro Madero acaba de anunciar que la Argentina cuenta con la tecnología de enriquecimiento de uranio. Este hecho convierte a la Argentina en el líder nuclear capaz de exportar tecnología nuclear a los demás países iberoamericanos.

Con la inauguración de la central nuclear de Embalse, el 3 de mayo de 1983, se completó una etapa fundamental del Plan Nuclear Argentino, y se puso fin a un largo proceso, plagado por dificultades técnicas, financieras y políticas.

La culminación de una central de la envergadura de Embalse —que elevará la potencia nucleoelectrica a 950 megavatios— ha salvado al Plan Nuclear. La legítima aspiración argentina de desarrollar el sector nuclear en forma autónoma y con fines pacíficos, que le ha valido a mi país un indiscutido liderazgo en América Latina, ha experimentado un gran impulso con la entrada en servicio de esta central.

En medio de una escena política de alta inestabilidad, el caso de la CNEA constituye una excepción, por la claridad de las metas expuestas y la continuidad de los esfuerzos emprendidos desde hace más de treinta años. Quizá las propias palabras del presidente de la CNEA, el vicealmirante Carlos Castro Madero, pronunciadas al inaugurar Embalse, sean la mejor síntesis de este fenómeno: "Esta obra es un testimonio más de lo que puede realizarse cuando en cumplimiento de una política se conjugan factores de

La central de Embalse y la independencia nuclear argentina



por Luis Calviño

continuidad y coherencia dentro de un riguroso marco ético. Tal continuidad y coherencia, preservadas en toda la historia de la CNEA pese a los avatares políticos que ha vivido la nación, ha permitido sostener para las centrales de potencia la elección de la línea de reactores a base de uranio natural y agua pesada que posibilita al país alcanzar la mayor autonomía posible en el campo nuclear, por permitir desarrollar localmente todo el ciclo del combustible".

La lucha por la independencia

Por cierto que tan preciado objetivo se ha ganado enemigos, dentro y fuera del país. En los siete años pasados, el Plan Nuclear sufrió salvajes recortes presupuestarios que —de no ser por la cohesión de las autoridades nucleares— hubieran amenazado su continuidad.

Ocurre que en el modelo de país planteado por los financieros después del golpe militar de 1976, la energía nuclear es un lujo innecesario. En una clara definición maltusiana, el doctor José Martínez de Hoz, ministro de Hacienda de 1976 a 1981, declaró alguna vez que pensaba en un país de diez millones de habitantes. . . ¡un tercio aproximadamente de los que tiene el país!

Los monetaristas contaron con la inestimable ayuda de una continua presión internacional, que trató en

todo momento de ahogar el crecimiento nuclear nacional. Argentina fue víctima de amenazas y coacciones esgrimidas en nombre de la causa de la no proliferación, viéndose sometida a una campaña para aislarla de la comunidad nuclear internacional.

Un tercer elemento de la estrategia destinada a paralizar cualquier transferencia de tecnología y materiales nucleares a países en desarrollo han sido las actividades de los grupos ecologistas y antinucleares. El llamado "terrorismo verde" tiene a mi país en la mira, alentado por las usinas ideológicas de la izquierda internacional y financiado por los centros de poder mundiales. La Argentina, que en la última década ha debido enfrentar a la subversión marxista y al imperialismo inglés, debe prepararse ahora para resistir la ofensiva de la no proliferación en sus varias manifestaciones, que busquen socavar el apoyo que el pueblo presto al desarrollo nuclear.

La importancia de Embalse

El 20 de diciembre de 1973, la Comisión Nacional de Energía Atómica firmó un acuerdo con Atomic Energy of Canada, Ltd. y una empresa italiana, aprobado luego por decreto 706, del 7 de marzo de 1974. La promesa canadiense de firmar un acuerdo de transferencia de tecnología con mi país, más las ventajas del reactor de uranio natural CANDU, hicieron la oferta canadiense más atractiva que la de la empresa alemana KWU.

La central, que debió haber entrado en servicio en enero de 1980, vio postergada su puesta en marcha más de tres años como resultado de los obstáculos financieros y políticos que pusieron los arquitectos de la política económica de Argentina después de 1976 y el propio gobierno de Canadá. El accidentado proceso llegó a su fin en diciembre de 1982, momento en que se inició la carga de combustible y de agua pesada en el reactor, que entró al tramo crítico en marzo de 1983. El 25 de abril, la central nucleoelectrica de Embalse fue sincronizada a la red del Sistema Interconectado Nacional, y por

Pase a la página 45

Prohíben otro plaguicida en los EU

El pasado septiembre, la Dirección de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, sus siglas en inglés), prohibió el uso en la agricultura del dibromuro de etileno porque se dice que este compuesto químico *contamina los mantos freáticos de varios estados de la Unión Americana y ha aumentado la posibilidad de que la población contraiga cáncer y sufra defectos congénitos.*

A pesar de que en los últimos años los "ecologistas" y los medios de comunicación han aterrorizado a la gente con el cuento de que el dibromuro de etileno produce cáncer, los científicos no han encontrado prueba alguna de que su empleo normal como plaguicida tienda a aumentar la posibilidad de que los humanos contraigan cáncer.

La verdad es que es precisamente la prohibición del dibromuro de etileno lo que dañará la vida humana. De no

dársele marcha atrás, esa prohibición hará imposible la producción de frutas en casi todo el hemisferio occidental, pues afectará a *todos los productores de cítricos de los Estados Unidos y a los exportadores de fruta del Caribe y América Latina.* Las alternativas que se presentan son mucho más costosas y menos efectivas. La misma Dirección de Protección al Medio Ambiente reconoce que, *nada más para los productores de cítricos de los Estados Unidos, las pérdidas resultantes de la prohibición ascenderán a 69 millones de dólares por año.*

También está en peligro el almacenamiento de granos. El dibromuro de etileno se utiliza para fumigar los silos y hasta el momento no hay un compuesto que lo sustituya.

¿Riesgo para quién?

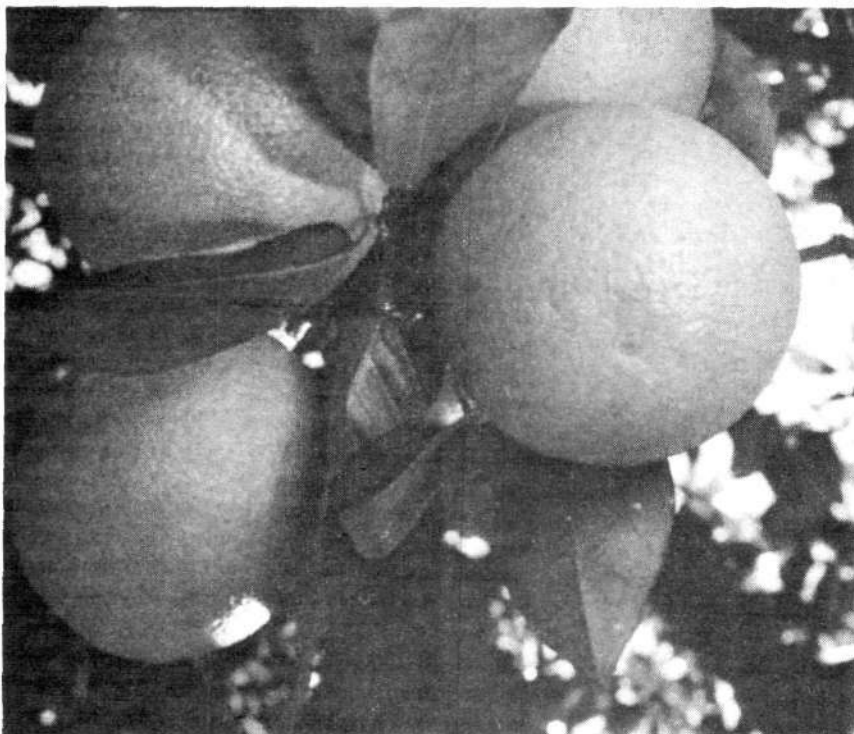
Desde 1948 el dibromuro de etileno se ha utilizado ampliamente para combatir nemátodos y otros insectos que

atacan a las frutas tropicales. La disposición de la EPA, dictada con carácter de urgente, prohíbe el uso del compuesto como plaguicida, el cual se inyecta en la tierra para matar a los bichos que atacan sobre todo los huertos de cítricos, pero también a las plantas jóvenes de algodón, papa y cacahuate, entre otras. La EPA también prohibió que se fumigue por un año con este compuesto a las frutas tropicales, los molinos de harina y los silos.

Tras siete meses de audiencias en las que se demostró que el dibromuro de etileno es un producto seguro, el director de la EPA, William Ruckelhaus —el mismo sujeto que reconoce haber prohibido el DDT, hace diez años, por razones políticas y no científicas—, pretende justificar la prohibición inmediata del plaguicida con el argumento de "los peligros que representa para la salud humana. . . rebasan claramente los beneficios que tendría el esperar los treinta días acostumbrados para que entren en vigor prohibiciones como ésta".

¿Qué entiende por "peligro para la salud humana" la dependencia que encabeza Ruckelhaus? A juzgar por sus decisiones, la EPA no aplica ese marbete a partir de pruebas científicas, sino según los vientos que predominen en la opinión pública, en tanto que deja de lado la consideración de los verdaderos peligros: ¿qué pasará cuando se deje de emplear el plaguicida en cuestión?

Por ejemplo, desde que se prohibió el DDT, en 1972, la incidencia de la malaria ha aumentado en todo el mundo; más de 210 millones de personas padecen actualmente la enfermedad, que cobra unos diez millones de víctimas al año. Un conocido experto en plaguicidas norteamericano, el entomólogo J. Gordon Edwards, de la Universidad Estatal de San José, California, ha calculado que, tan sólo en los Estados Unidos, las medidas contra el empleo de plaguicidas han causado, directa o indirectamente, entre 60 y 100



La prohibición del plaguicida EDB amenaza acabar con la producción de cítricos en el hemisferio occidental.

millones de muertes al año. Semejante pérdida de vidas humanas no entra en los cálculos de la EPA cuando prohíbe un plaguicida. ¿O, tal vez, sí?

Lo que dice la ciencia

El veredicto científico sobre el dibromuro de etileno es definitivo: no se ha demostrado que cause cáncer en los seres humanos o afecte su capacidad reproductora, aun cuando se han encontrado ambos efectos en ratones de laboratorio. La prensa, no obstante, rara vez cita a científicos, y prefiere en cambio hacer creer que los resultados obtenidos con ratones corresponden a resultados con seres humanos.

He aquí lo que me han dicho los expertos en entrevistas recientes:

Doctor Sorell Schwartz, del Departamento de Farmacología de la Escuela de Medicina de la Universidad de Georgetown: "Si bien, en experimentos de laboratorio, el dibromuro de etileno ha resultado ser un carcinógeno potente en animales, 35 años de experiencia de contacto humano con el producto no indican que haya un grado equivalente de peligro para los seres humanos. . . El peligro de contraer cáncer cuando se usan plaguicidas en forma correcta es extremadamente reducido, y la idea de que existe semejante peligro es puramente teórica, basada en métodos de evaluación matemática sumamente discutibles".

Doctor Ely M. Swisher, especialista con 38 años de experiencia en la industria de los plaguicidas: "Hasta donde yo sé, nunca ha habido un solo caso de cáncer atribuible al empleo de plaguicidas en productos alimenticios. . . Todos los alegatos en el sentido de que los plaguicidas causan cáncer se basan en especulaciones. . . No ha habido un solo caso de alguien que haya sufrido una enfermedad seria por comer frutas o verduras que contuviesen la cantidad normal de residuos que deja el plaguicida. Estos residuos no causan enfermedad alguna. La cantidad legalmente permitida es tan reducida, que no hay modo de que ocurra".

Con todo, la prensa fue la que decidió el debate. Al decir de muchos observadores, lo que precipitó la decisión de la EPA fue la propaganda que se hizo en torno a un accidente en el que murieron dos trabajadores en Bakersfield, California, hace un año, por



Un empleado cosechando naranjas.

entrar a un tanque de dibromuro de etileno, que creyeron vacío, para limpiarlo. La campaña "ecologista" culminó a mediados del pasado septiembre, cuando la cadena de televisión ABC difundió un documental aterrador dirigido a convencer a la gente de que es lo mismo cualquier mínimo residuo del plaguicida que la gran cantidad de él que había en el tanque fatal cuando sucedió el accidente.

La decisión de la EPA vino enseguida. —Marjorie Mazel Hecht

Comentario

Viene de la página 43

último, el 3 de mayo de inaugurada oficialmente.

La construcción del segundo proyecto nucleoelectrico implica un paso decisivo en el desarrollo de la industria y la ingeniería nuclear local. La participación nacional en Embalse representó el 33 por ciento de la ingeniería, el 100 por ciento de la obra civil, el 95 por ciento del montaje y el 33 por ciento de los suministros electromecánicos, cifras que suponen un sustancial incremento respecto de los porcentajes alcanzados en la construcción de Atucha I.

Desde el punto de vista puramente energético, la importancia de Embalse resulta obvia. La nueva central cuenta con el turbogruppo de mayor potencia del país, que duplica casi al equipo que le sigue. La participación del sector nuclear en la potencia instalada se elevará a un 7 por ciento con el ingreso de Embalse.

Después de Embalse

En vísperas de un profundo cambio institucional, que pudiere culminar con el retorno del peronismo al gobierno, cabe analizar las perspectivas que se abren al sector nuclear a la luz de este cambio. De formarse un gobierno justicialista, respaldará sin lugar a dudas los avances realizados en este campo, ya que, como se sabe, fue el general Perón quien echó las bases del desarrollo nuclear durante su primer y segundo periodos (entre los años 1946 y 1955).

Cabe esperar todo tipo de presiones tendientes a congelar el crecimiento nuclear argentino en los próximos meses. A la intriga diseminada por la inteligencia británica acerca del supuesto desarrollo de armas nucleares se habrá de agregar, en virtud del clima de efervescencia electoral, la eventual acción de organizaciones antinucleares vernáculas. Es de desear que el justicialismo oponga a esta maniobra de pinzas la clara voluntad de hacer del sector nuclear la piedra basal de la recuperación argentina, proyectando a su vez este impulso al servicio de una causa en la que ha sido pionero: la integración latinoamericana en el marco de un orden internacional más justo.



McDonnell Douglas Corporation

Un ingeniero de la corporación McDonnell Douglas y un inspector de NASA examinan cuidadosamente las operaciones del aparato espacial de electroforesis en la preparación del séptimo viaje del transbordador espacial Columbia.

Medicamentos 'espaciales' contra la diabetes

Entre los varios experimentos científicos que llevó a cabo la más reciente misión del transbordador espacial de los Estados Unidos, destacan por su importancia en la lucha por prolongar la vida humana las pruebas de un dispositivo de electroforesis de flujo continuo. Es la cuarta vez que el dispositivo vuela al espacio extraterrestre, sin que la NASA cobre un centavo a los experimentadores.

La electroforesis es un método para separar células orgánicas de líquidos haciendo pasar a éstos por un campo eléctrico. Las diferentes células y partículas se separarán según su carga eléctrica. Se emplea la electroforesis para separar células utilizadas en el tratamiento de enfermedades crónicas como la diabetes.

Pero, en la superficie terrestre, la gravedad hace que se formen corrientes en el líquido, lo que obliga a emplear flujos muy lentos y campos eléctricos muy pequeños. Desde 1977,

científicos de dos empresas norteamericanas empezaron a trabajar para hacer electroforesis en el espacio extraterrestre, con la idea de lograr flujos más veloces, mayor productividad y, tal vez, mayor pureza, gracias a que la gravedad es nula.

Con el dispositivo experimental que se instaló en el transbordador se ha logrado multiplicar por 700 la velocidad del flujo y por 400 la pureza del material obtenido. Si todo sigue en esa dirección, hacia fines de esta década se podría iniciar su explotación comercial y poner a disposición de la medicina nuevos recursos para combatir enfermedades crónicas como la diabetes y, para ese entonces, la hemofilia.

Algunas enfermedades crónicas consisten en la falta de una hormona u otra substancia, elaborada normalmente por cierto tipo específico de célula. Si hubiere modo de implantarle al paciente la dotación necesaria de células productoras normales, enfer-

medades como la diabetes —que resulta de la falta de insulina, hormona producida por las células pancreáticas tipo beta— podrían curarse. Los investigadores han separado células beta de material pancreático por electroforesis, pero ni en la cantidad ni con la pureza que haga factible su transplante a los pacientes.

La electroforesis en el espacio puede cambiar radicalmente esa situación. La empresa McDonnell Douglas planea construir un dispositivo de mayores dimensiones, que podrá instalarse en el compartimento de carga de la estación orbital que la NASA lanzará para 1985. El aparato podría producir material suficiente para iniciar pruebas médicas en 1987.

Los científicos planean aplicar la electroforesis en el espacio extraterrestre para obtener también interferón, productos contra la hemofilia, hormonas del crecimiento, etc.

—Marsha Freeman

El futuro de Argentina: industrialización e integración

LA ARGENTINA INDUSTRIAL: EJE DE LA INTEGRACION IBEROAMERICANA

por un grupo de trabajo de
Executive Intelligence Review
con prólogo de
Lyndon H. LaRouche
Editorial Peña Lillo
Buenos Aires

Argentina puede y debe jugar un papel decisivo en la tarea de hacer de Iberoamérica una superpotencia industrial. Esa es la tesis central del libro que acaba de aparecer en Buenos Aires bajo el título de *La Argentina industrial: eje de la integración iberoamericana*, y el cual aplica el modelo econométrico LaRouche-Riemann para analizar la economía de ese país y planear su futuro. El texto es obra de un grupo de trabajo de la revista *Executive Intelligence Review*, cuyo fundador, Lyndon H. LaRouche, escribió el prólogo.

El libro sale a la venta en medio de la peor crisis económica de que se tenga conocimiento en los anales de la historia iberoamericana. Todas y cada una de las naciones de la región sólo tienen, aparentemente, una disyuntiva: o aceptan el estrangulamiento económico del Fondo Monetario Internacional—conocido por los eufemismos de "medidas de austeridad" o de "reajustes"—, o dejan de pagar sus deudas, con el riesgo consiguiente de la suspensión de créditos, el bloqueo comercial y hasta la intervención militar. El libro describe una tercera alternativa, la única que asegura la sobrevivencia y el retorno al crecimiento económico del continente: la creación de un mercado común iberoamericano, capaz de poner en práctica programas agrícolas e industriales de gran envergadura, en Argentina y en el resto del continente, utilizando las técnicas más avanzadas que nos da la ciencia.

En el prólogo, LaRouche describe los

medios de que dispone Iberoamérica para lograr que los Estados Unidos se unan a este esfuerzo continental: ofrecerle a los Estados Unidos una idea de conjunto para lograr el rápido desarrollo económico del continente, empezando por la reorganización de la deuda, reformas bancarias tanto regionales como nacionales para favorecer la inversión de capital y la estabilidad de las monedas, y la creación de nuevas oportunidades de exportar bienes de capital por valor de decenas de miles de millones de dólares. Ello quitaría cualquier base objetiva a la subversión en el continente y permitiría instaurar "relaciones especiales" entre Iberoamérica y los Estados Unidos que vayan en el interés estratégico de ambas partes. El prólogo incluye un resumen de las propuestas contenidas en uno de los más famosos trabajos de LaRouche, *Operación Juárez*, publicado por *Executive Intelligence Review* en agosto de 1982.

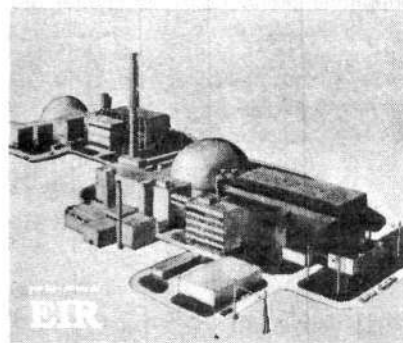
Los autores del libro establecen que ya en 1960 Argentina tenía la capacidad de iniciar el camino a la industrialización y convertirse en una nación completamente industrializada, lo que en estos momentos de crisis hubiera incrementado grandemente el poderío estratégico de toda la región. El ingreso per cápita de la Argentina en 1960 era superior al del Japón. A pesar de la devastadora gestión de Raúl Prebisch, durante el periodo 1955-1958, y luego la de Martínez de Hoz y sus sucesores desde 1976, la Argentina tiene aún la capacidad de sostener un acelerado desarrollo industrial, a un ritmo superior al de los demás países del continente, y para encender la mecha del renacimiento científico de todos los países de la región.

Primeramente, señalan los autores, la Argentina debe capitalizar sus grandes logros en la ciencia y en la tecnología de su programa nuclear, el cual,

La Argentina industrial

Eje de la
integración iberoamericana

Con prólogo de Lyndon H. LaRouche



fuera del sector avanzado, ocupa el segundo lugar mundial, después del de India. Argentina debe iniciar inmediatamente un programa de urgencia para incrementar el número de sus reactores nucleares, y convertirse en el exportador de técnicas nucleares para el resto del continente. El programa contempla también aumentar el número de científicos nucleares en Argentina, al tiempo que se forma a científicos del resto de los países de la región.

En segundo lugar, indican los autores, Argentina debe escoger en todos los campos industriales y militares las técnicas más avanzadas, como la de los rayos láser, y guiar a la región entera en la investigación y el perfeccionamiento de tales técnicas.

En tercer término, se debe atender la educación con la misma orientación. Se recomienda la creación de al menos cuatro grandes centros de investigación en diferentes partes del país, que cubran los campos de láseres, energía nuclear, oceanografía, meteorología, astronomía e investigación agrícola. Dichos centros, además de sus labores de investigación, darán capacitación para el empleo de las nuevas técnicas.

En cuarto lugar, el libro establece que la Argentina tiene que aprovechar sus recursos naturales: sus inmensos recursos hidráulicos, su potencial agrícola y su gas natural, para lograr un

crecimiento de al menos 10 por ciento anual y obtener el excedente exportable —principalmente de productos agrícolas— necesario para enfrentar y sobrevivir cualquier medida de guerra comercial que pueda tomarse en contra del continente. Se podrá regar más de 35 millones de hectáreas de cultivo, así como otras 20 que actualmente se utilizan para la cría extensiva de ganado. Con los grandes rendimientos que se obtiene con el uso de fertilizantes y el riego, la Argentina puede triplicar o cuadruplicar su producción de alimentos en menos de 10 años, y generar así un excedente que puede garantizar la seguridad alimentaria de todo el continente por tiempo ilimitado.

Las grandes obras para aprovechar el río Parana avanzan con lentitud extrema. Deben de acelerarse e incorporarse a proyectos industriales que espoleen más directamente el crecimiento de la industria y de la agricultura en las regiones norteñas del país.

La Argentina podría ser una potencia económica mundial. ...en los próximos veinte años el país podría alcanzar un ritmo de crecimiento superior al diez por ciento por año. Para lograr esto hay que emprender grandes proyectos de desarrollo infraestructural en el país, e integrarlo económicamente con el resto de Iberoamérica a través de un Mercado Común.

Finalmente, los autores, haciendo uso del modelo econométrico La-Rouche-Riemann, muestran que el índice de crecimiento que se puede obtener siguiendo el programa recomen-

dado es del 10 al 12 por ciento en general y puede ser de hasta 15 y 18 por ciento si se seleccionan las técnicas más avanzadas existentes y por perfeccionar. El modelo también muestra los efectos de la catástrofe que el ministro José Martínez de Hoz ocasionó al país con sus prácticas monetaristas: además de una prolongada depresión y una inflación que llega ya al 500 por ciento, la destrucción literal de la valiosa fuerza de trabajo industrial, esencial para la recuperación y el desarrollo.

El libro es un llamado al nuevo gobierno de la Argentina, que se elegía en el momento de su edición, a adoptar la única alternativa posible tanto al desastre que representa la devastación ordenada por el FMI como a la amenaza, que a muchos paraliza, de ser víctima de desestabilizaciones internas anárquicas en combinación con la guerra económica más desafortunada y criminal.

Nuestro negocio es la inteligencia



EIR es un semanario de inteligencia política y económica con renombre internacional elaborado por más de 200 especialistas desde 40 de las principales capitales del mundo. EIR recientemente comenzó a publicar en español, *Resúmen Ejecutivo de EIR* con la misma calidad y prestigio.

Damos información de valor decisivo que nadie más le puede ofrecer. En la última década nos hemos ganado la reputación de ser quienes con más tino pronosticamos los acontecimientos en el ámbito económico y político.

Y francamente no somos imparciales. Defendemos el progreso científico e industrial y nos oponemos a las estrategias y a los grupos que obstaculizan el desarrollo. *EIR: nuestro negocio es la inteligencia.*

SUSCRIBASE AHORA MISMO

Nombre _____

Dirección _____

Ciudad _____ País _____

Envío cheque o giro postal por

Resúmen Ejecutivo

70 dólares (6 meses)

135 dólares (un año)

EIR (64 páginas en inglés)

135 dólares (3 meses)

245 dólares (6 meses)

450 dólares (un año)

Pagadero a:

Executive Intelligence Review

304 West 58th Street, Suite 500, Dept. F-01, New York, N.Y. 10019 U.S.A.

En este número

EL ABECÉ DE LA FÍSICA DE PLASMAS.

El 99 por ciento del universo se compone de materia en estado de plasma. La ciencia moderna está a punto de reproducir aquí en la Tierra el mismo tipo de reacciones nucleares que hacen brillar a esas enormes concentraciones de plasma ardiente —como nuestro Sol— que llamamos estrellas. La física de plasmas es, entonces, la llave que abrirá para el hombre la fuente de energía, prácticamente innagotable de la fusión termonuclear controlada.

LA REVOLUCION DE LOS LASERES.

Gracias a su capacidad de concentrar energía, los láseres —en forma de armas de rayos— son el medio de defensa más eficaz contra un ataque nuclear. Su perfeccionamiento abre al mismo tiempo las puertas a una revolución científico-técnica de tremendos alcances, que en unas décadas puede hacer que nuestros actuales medios de producción parezcan de la edad de piedra.

