

EL COHETE VASIMR • MEJORA GENETICA DEL TRIGO

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

ENERO 2001  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## POSIBILIDADES TECNICAS DEL OCIO DIGITAL



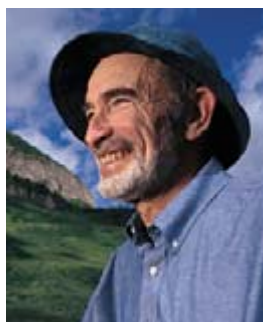
### REACCION NUCLEAR EN CADENA



## SECCIONES

**3**  
**HACE...**  
50, 100 y 150 años.

**24**  
**PERFILES**  
Paul R. Ehrlich:  
¿Somos demasiados?



**26**  
**CIENCIA Y SOCIEDAD**  
Evolución, origen del vuelo...  
El pH... Galaxias ricas  
en gas molecular... Mejora  
industrial... Transporte  
de protones a través de proteínas... Energía eléctrica.



**36**  
**DE CERCA**  
Fracturas  
por H. Van Damme,  
F. Duval y Y. Abdelhaye



## INFORME ESPECIAL



39

- |  |   |
|--|---|
| <b>42 Creación de convergencia</b><br><i>Peter Forman y Robert W. Saint John</i> | <b>62 El cine digital y sus posibilidades</b><br><i>Peter D. Lubell</i> |
| <b>49 Guerra en la música</b><br><i>Ken C. Pohlmann</i>                          | <b>64 Humanos virtuales</b><br><i>Alvy Ray Smith</i>                    |
| <b>54 Transición en el rodaje</b><br><i>Peter Broderick</i>                      | <b>71 Un mundo virtual a medida</b><br><i>Glorianna Davenport</i>       |

## El Cohete VASIMR

*Franklin R. Chang Díaz*

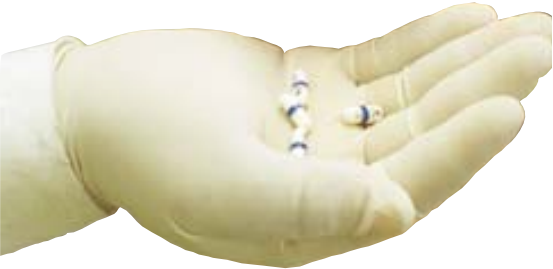
4



Disponíamos hasta ahora de dos tipos de cohetes: potente y devorador de combustible uno y de escasa potencia, aunque eficiente, el otro. Explicamos aquí los pasos dados hacia la creación de un tercero, que combina las ventajas de ambos.

## 12 Fármacos antisida para Africa

*Carol Ezzell*



La mayoría de los 35 millones de personas infectadas con el virus del sida viven en el continente africano, donde escasean los fármacos con los que se puede combatir el VIH. ¿Permitirá el mundo que mueran estas personas?

18



## La extraña pareja y la bomba

*William Lanouette*

La primera reacción nuclear en cadena controlada y el proyecto Manhattan resultaron de la colaboración explosiva entre los físicos Enrico Fermi y Leo Szilard.

## 75 La mejora genética del trigo

*Pilar Barceló y Adoración Cabrera*



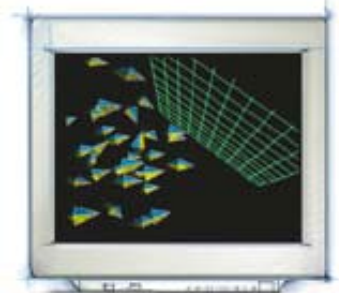
Gracias al avance de las técnicas de la biología molecular, se está logrando una mayor eficacia de los programas de mejora, un conocimiento más profundo de la genética de los caracteres de interés agronómico y nuevos sistemas de alteración de las propiedades hereditarias.

## SECCIONES

84

### TALLER Y LABORATORIO

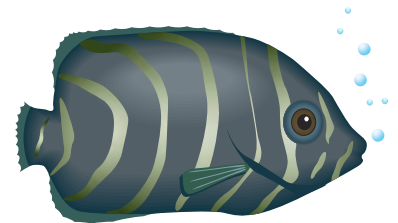
Dios los cría y ellos se juntan, por Shawn Carlson



86

### JUEGOS MATEMÁTICOS

Limo espiral, por Ian Stewart



88

### IDEAS APLICADAS

Tests del embarazo, por Rebecca Lipsitz

90

### NEXOS

Pervivencia, por James Burke

92

### LIBROS

Revolución Científica, Astronomía para todos, Química orgánica





**Portada:** Philip Howe  
y Mac Congrave

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

| Página | Fuente  |
|--------|---|
| 4-5    | Pam Francis   |
| 6      | Samuel Velasco  |
| 7      | Juan Velasco ( <i>arriba</i> );<br>John de Santis ( <i>abajo</i> )  |
| 8-9    | Pam Francis   |
| 10     | John de Santis  |
| 12-13  | Karin Retief/ <i>Trace Images</i>   |
| 14     | Dan Wagner; Cortesía de Irene<br>Franck ( <i>píldoras</i> )   |
| 15-17  | Karin Retief/ <i>Trace Images</i>   |
| 18-21  | Jennifer Johansen   |
| 22     | "March of Time"/Time Pix  |
| 23     | AIP Emilio Segrè Visual<br>Archives   |
| 39     | Tom Draper Design<br>( <i>ilustración</i> ); Sony Pictures<br>Imageworks ( <i>Hollow Man</i> );<br>Atomfilms ( <i>Space Dog</i> );<br>Katia Natola <i>S.I.N./Corbis</i><br>( <i>Metallica y detalle de<br/>guitarra</i> ); ©2000 Warner Bros.<br>( <i>The Perfect Storm</i> )         |
| 40     | Terry Renna ( <i>izquierda</i> ); Sony<br>Computer Entertainment<br>( <i>derecha</i> )  |
| 41     | RMN/Art Resource, New York  |
| 42-43  | Tom Draper Design   |
| 44     | Bryan Christie  |
| 45     | ABC, Inc.   |
| 46-47  | Bryan Christie  |
| 48     | Cortesía de los autores   |
| 49     | Lisa Pines; Newsmakers<br>( <i>inserto</i> )  |
| 50     | Bryan Christie  |
| 51     | Dennis Cook <i>AP Photo</i>   |
| 52     | Cortesía del autor  |
| 54-55  | Next Wave Films   |
| 56-57  | George Retseck  |
| 58-59  | Bryan Christie  |
| 60     | Cortesía del autor  |
| 63     | George Retseck ( <i>arriba</i> );<br>Sherri A. Liberman ( <i>abajo</i> )  |
| 64     | Cortesía de Sony Pictures<br>Imageworks   |
| 66-67  | ©2000 Warner Bros.  |
| 68-69  | Pixar Animation   |
| 70     | Pixar Animation ( <i>arriba</i> );<br>Louis Fabian Bachrach ( <i>abajo</i> )  |
| 71     | Webb Chappel  |
| 72-73  | Cortesía de Edwin Brit Wyckoff<br>( <i>Winky Dink</i> ); cortesía de David<br>Winter ( <i>Pong</i> ); Digital Leisure,<br>Inc. ( <i>Dragon's Lair</i> ); Maxis,<br>Inc. ( <i>Sim City</i> ); Cyan, Inc.<br>( <i>Myst</i> ); Screen Shot from<br>America Online ( <i>Big Brother</i> ) |
| 74     | Webb Chappel  |
| 76-83  | Pilar Barceló<br>y Adoración Cabrera  |

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Agradados: *El cohete VASIMR*; Esteban Santiago: *Fármacos antisida para África*; Xavier Roqué: *La extraña pareja y la bomba*; Luis Bou: *Introducción al Informe especial, Creación de convergencia, Guerra en la música, De cerca y Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Transición en el rodaje, El cine digital y sus posibilidades y Perfiles*; Juan Pedro Campos: *Humanos virtuales y Un mundo virtual a medida*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

### Ciencia y sociedad:

José Manuel García de la Mora: *El pH, devaneos filológicos*

## INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)

Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

MANAGING EDITOR Michelle Press

ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee,

George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette

PRODUCTION William Sherman

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Rolf Grisebach

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.ª  
08021 Barcelona (España)  
Teléfono 93 414 33 44  
Fax 93 414 54 13

### Precios de suscripción:

|            | Un año                    | Dos años                   |
|------------|---------------------------|----------------------------|
| España     | 8.800 pta.<br>52,89 euro  | 16.000 pta.<br>96,16 euro  |
| Extranjero | 11.500 pta.<br>69,12 euro | 21.500 pta.<br>129,22 euro |

### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro  
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados  
es el mismo que el de los actuales.

## DISTRIBUCION

### para España:

**LOGISTA, S. A.**  
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)  
28108 Alcobendas (Madrid)  
Tel. 91 484 39 00

### para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona  
Teléfono 93 414 33 44

## PUBLICIDAD

GM Publicidad  
Francisca Martínez Soriano  
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.  
28009 Madrid  
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

### Cataluña y Baleares:

Miguel Munill  
Muntaner, 339 pral. 1.ª  
08021 Barcelona  
Tel. 93 321 21 14  
Fax 93 414 54 13

Difusión  
controlada

Copyright © 2000 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2001 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocopros reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona  
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

# HACE...

## ...cincuenta años

**EL CUERPO HUMANO EN EL ESPACIO.** «¿Qué tal le irá al explorador humano en su astronave? La ingravidez evoca una imagen placentera: flotar en el espacio sin tensiones de ningún tipo parece una situación agradable e incluso ventajosa. Pero no será tan poco preocupante como parece. Es más que probable que la naturaleza nos cobre su precio por ese paseo gratis. En la Tierra carecemos de experiencia que nos indique sobre algo similar. Parece que no hay que prever dificultades graves en las funciones de la circulación sanguínea y en la respiratoria. Es en el sistema nervioso humano, sus órganos perceptivos y su mente, donde podemos esperar complicaciones cuando el cuerpo se torne ingrávido.»

**DIANÉTICA.** [Reseña de libro] «Dianética: Ciencia Moderna de la Salud Mental, por L. Ron Hubbard, Hermitage House (4 dólares). Este volumen es probablemente el que contiene más promesas y menos hechos que cualquier otra publicación desde la invención de la imprenta. Brevemente, su tesis es que el hombre es intrínsecamente bueno, posee un recuerdo perfecto de todos los sucesos de su vida y es bastante más inteligente de lo que aparenta. Sin embargo, una cosa llamada engrama impide que esas características se realicen en la conducta humana...

Mediante un proceso llamado ensueño dianético, que se asemeja a la hipnosis y que al parecer puede practicar cualquiera entrenado en la dianética, pueden evocarse tales engramas. Conseguido esto, los engramas son 'reclasificados' y el paciente queda 'libre'... El sistema se presenta sin títulos ni datos.»

## ...cien años

**PRODUCCIÓN DE VACUNAS ANTI-VARIÓLICAS.** «Hasta 1876, en Nueva York era práctica común la vacuna brazo a brazo, y la linfa se tomaba de la ampolla de un niño de pocos meses ya vacunado. Pero la linfa humana siempre resultó inquietante, al tratarse de un posible foco de infección de enfermedades sanguíneas. En 1876 el departamento de sanidad de la ciudad puso los cimientos del laboratorio de vacunación actual. A una ternera se le practica una incisión lineal superficial en la piel, en la que se unta el virus de la vacuna. A los pocos días aparecen las ampollas de las que se obtiene el virus. Este, emulsionado en glicerina, se introduce en pequeños tubos capilares de vidrio, cada uno de los cuales contiene el virus suficiente para una vacuna.»

**TURBINAS DE VAPOR.** «Al igual que las turbinas terrestres [para generar electricidad], como las instaladas en Inglaterra y Alemania, han

superado a los mejores motores alternativos de triple expansión en producción de vapor, en las instalaciones marinas la turbina de vapor está destinada a sustituir al motor alternativo en todos los buques rápidos, desde los medios hasta los grandes tonelajes.- Charles A. Parsons» [Nota de la redacción: A Parsons se le considera el inventor de la turbina de vapor moderna.]

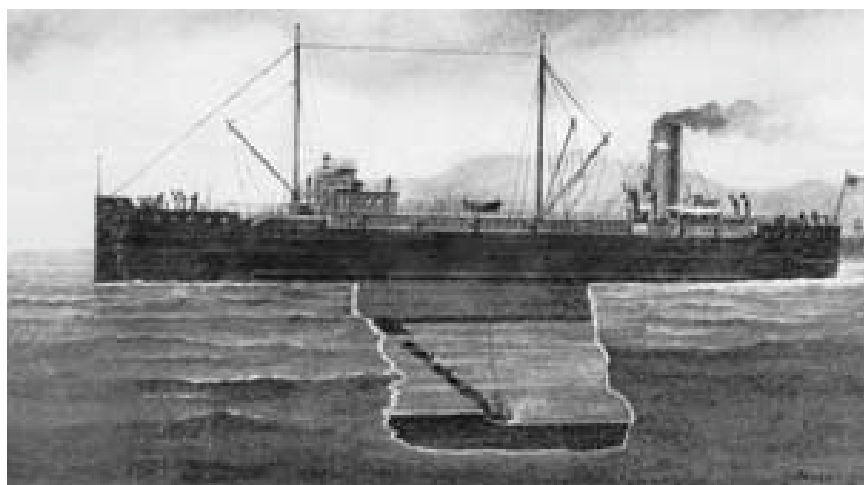
**EL EXTERMINIO DE LOS MOSQUITOS.** «No debe sorprendernos esta predicción para el siglo que viene: De las ventanas desaparecerán las mosquiteras, gracias a la exterminación en masa de esos insectos. Los organismos sanitarios habrán destruido todos los nidos y criaderos, avenado todas las charcas estancadas, desecado todos los terrenos pantanosos y tratadas químicamente todas las corrientes de aguas tranquilas.»

**SEGUROS ANTIANARQUISMO.** «El rey Alejandro de Serbia ha intentado asegurar su vida por dos millones de dólares en varias compañías, pero una de ellas, a las que solicitó un seguro por 300.000 dólares, rechazó suscribir la póliza aduciendo la proliferación de los delitos anarquistas.»

**DRAGA HIDRÁULICA.** «El rápido aumento que en los últimos años ha tenido lugar en el tamaño y calado de los vapores oceánicos ha hecho necesario ahondar considerablemente los canales tanto de los accesos al puerto de Nueva York como en el puerto mismo. Se incluye una ilustración de una de las dos dragas de ganguiles hidráulicas (las más potentes de su clase en el mundo) que excavarán unos treinta millones de metros cúbicos del nuevo canal Ambrose. Es capaz de extraer arena y agua por el conducto mediante una bomba de dragado de más de 1,2 metros en aspiración y descarga.»

## ...ciento cincuenta años

**MEDICINA NAPOLITANA.** «Los napolitanos son de la opinión de que las sangrías son necesarias en numerosas enfermedades para las que, entre nosotros, se considerarían fatales.»



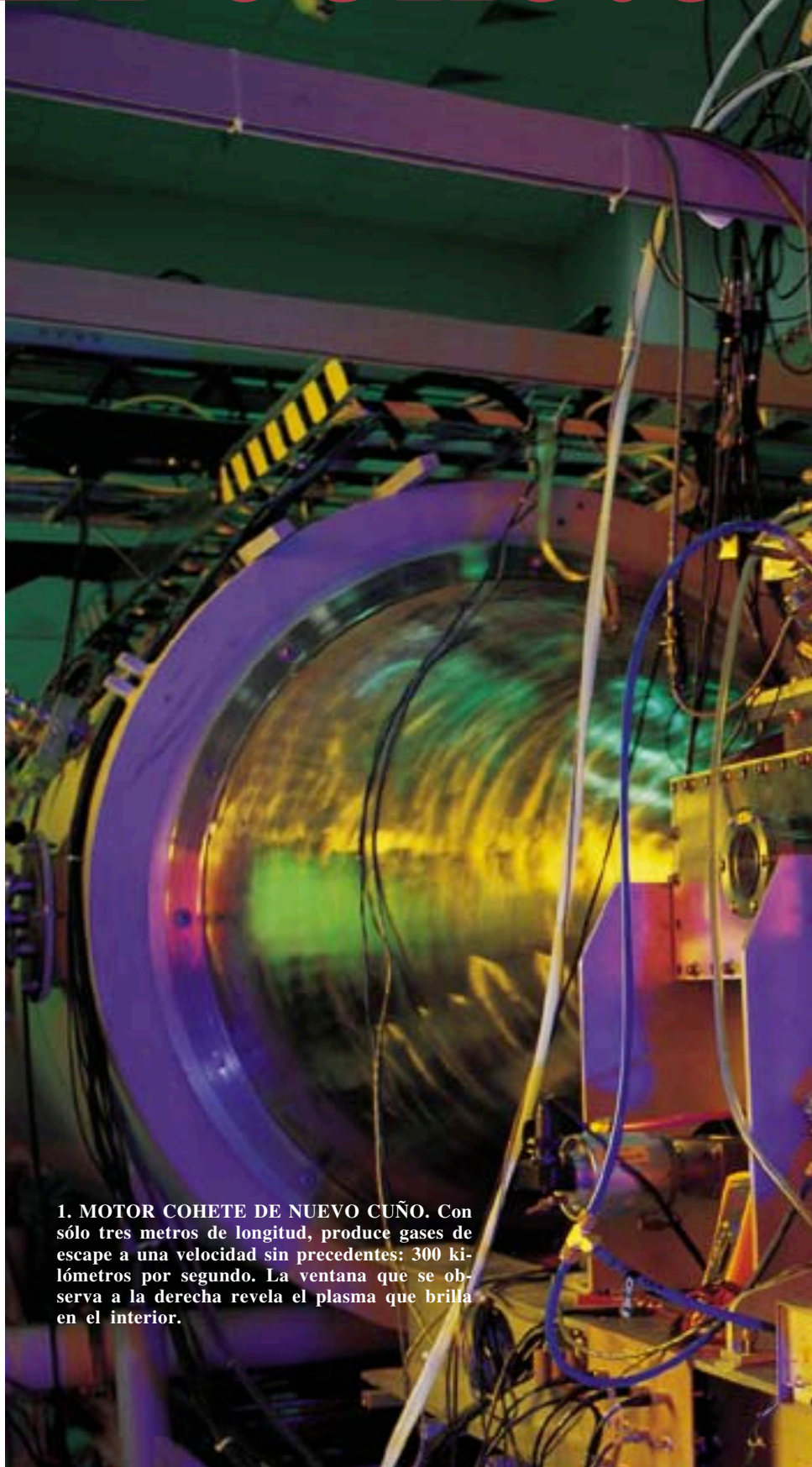
DRAGA HIDRAULICA para el puerto de Nueva York, 1901

# El cohete

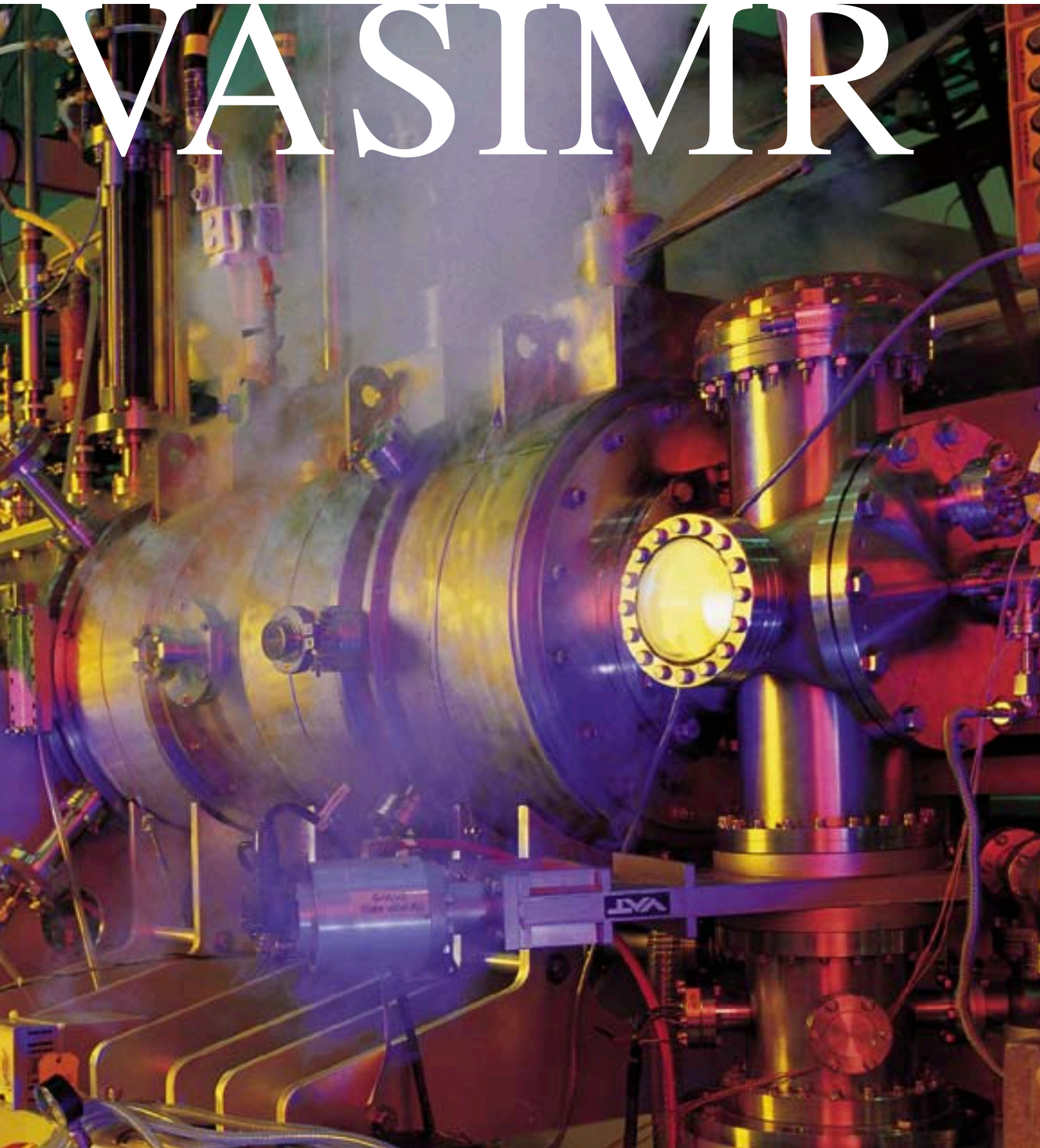
Franklin R. Chang Díaz

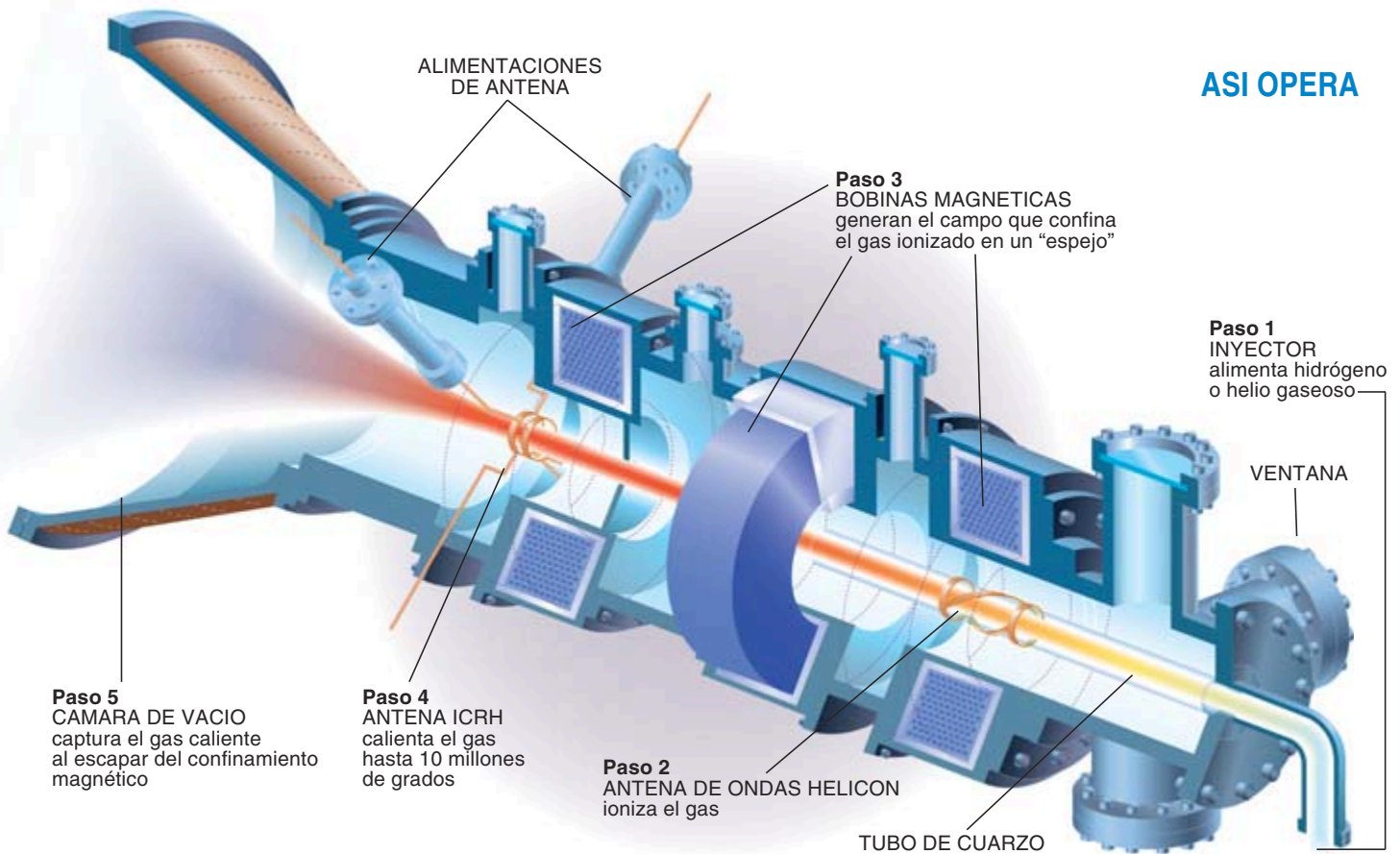
**S**oñamos con ir a las estrellas. Los de mi generación pasamos la infancia, allá por los años cincuenta, imaginándonos que un día seríamos pilotos del espacio. Comprobé más tarde que aquella fascinación no era privativa de mi educación en Costa Rica. Muchos de mis actuales colaboradores, procedentes de distintas partes del mundo, relatan semejantes anhelos infantiles. En los últimos 50 años, he sido testigo del desarrollo de las primeras naves que han transportado al hombre allende los confines de la Tierra. En los últimos 20, he tenido la suerte de subir a bordo de alguno de estos cohetes y recibir una impresión de primera mano de las maravillas que imaginaba. Parece como si estuviésemos destinados a abandonar nuestro frágil planeta y desplazarnos en el cosmos en una nueva odisea humana. Esta empresa dejaría pequeña a la aventura colombina.

**1. MOTOR COHETE DE NUEVO CUÑO.** Con sólo tres metros de longitud, produce gases de escape a una velocidad sin precedentes: 300 kilómetros por segundo. La ventana que se observa a la derecha revela el plasma que brilla en el interior.



*Disponíamos hasta ahora de dos tipos de cohetes: potente y devorador de combustible uno y de escasa potencia, aunque eficiente, el otro. Explicamos aquí los pasos dados hacia la creación de un tercero, que combina las ventajas de ambos*





Aún carecemos de las naves necesarias para aventurarse hasta distancias lejanas en la inmensidad del espacio. Con los cohetes químicos actuales, un viaje a Marte tardaría diez meses en una nave espacial limitada y vulnerable. Habría poco sitio para la carga útil. La mayor parte de la masa de la nave se ocuparía con el agente propulsor, que se gastaría en unas pocas igniciones breves, dejando que la nave se desplazase por inercia durante un largo tramo del viaje. Si se tuviese que viajar hasta Marte en estas condiciones, la tripulación se resentiría bastante. Los meses de exposición a la ingravidez debilitarían músculos y huesos, y la radiación persistente del espacio exterior dañaría el sistema inmunitario.

FRANKLIN R. CHANG DIAZ ha volado en cinco misiones espaciales. Durante las mismas se lograron el despliegue de la sonda Galileo hacia Júpiter, las dos primeras pruebas de acoplamiento espaciales y el anclaje final del transbordador en la Mir. Además de su carrera astronáutica y su investigación en plasma, ha trabajado en programas de salud mental y rehabilitación de dro-

Para que fuese segura, la nave interplanetaria tripulada debería ser rápida, fiable y capaz de interrumpir la misión en caso de fallo. Sus sistemas de propulsión han de estar preparados para abordar no sólo la fase de travesía, sino también las maniobras cerca de los planetas de origen y destino. Mientras la propulsión química puede continuar proporcionando un excelente medio de transporte desde la superficie hasta la órbita, se necesitan nuevas técnicas para enviar el hombre a los planetas y a las estrellas.

Los cohetes de plasma son una de estas técnicas. Usando gases ionizados acelerados por campos eléctricos y magnéticos, se aumenta su rendimiento mucho más allá de los límites del cohete químico. Mi equipo de investigación ha venido trabajando en esa dirección desde principios de los años ochenta. Se trata del Cohete de Magnetoplasma con Impulso Variable Específico (VASIMR). Su génesis se remonta a finales de los setenta, cuando estudiaba los conductos magnéticos y su aplicación a la fusión nuclear controlada. En estos conductos, un campo magnético aísla un plasma caliente de su superficie material más cercana, dejando que alcance temperaturas de cientos de millones de grados.

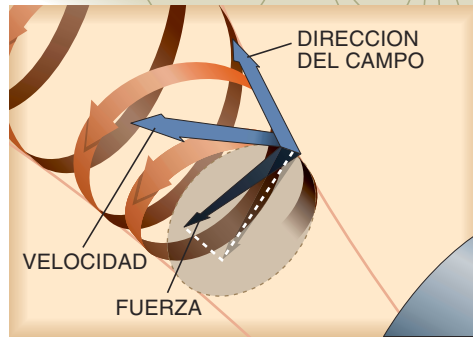
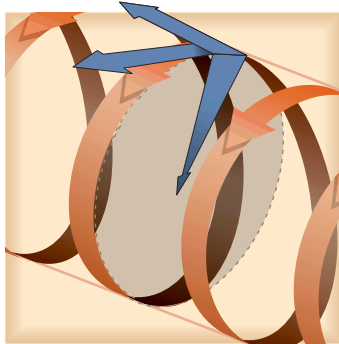
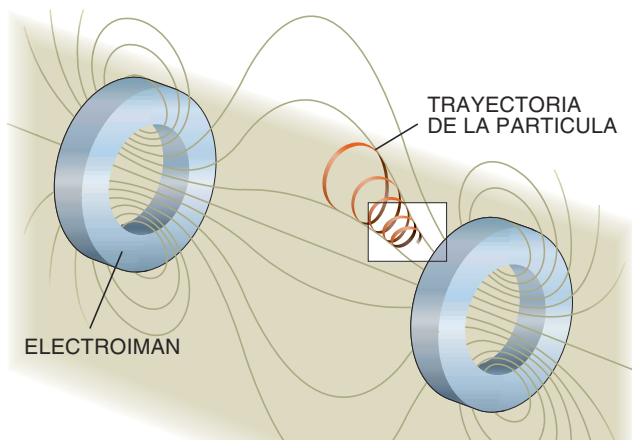
Avancé la teoría de que un conducto, con forma adecuada, podría crear una tobera magnética y convertir la energía del plasma en empuje para un cohete. Esta estructura funciona como una tobera de un cohete tradicional, pero puede soportar temperaturas mucho mayores. Posteriores investigaciones sugirieron que el sistema podría también generar gases de escape variables y adaptables a las condiciones del vuelo, del mismo modo que la transmisión de un automóvil adopta la potencia del motor a las peculiaridades de la carretera. Aunque la idea de gases de escape variables nació con los cohetes, su aplicación a los cohetes químicos con toberas de material estático se ha manifestado poco práctica. En el VASIMR la idea ha madurado lo suficiente para encarnarse en realidad.

### El cohete de Newton

El principio de la propulsión por cohetes parte de la ley newtoniana de acción y reacción. Un cohete se impulsa a sí mismo expulsando material en dirección opuesta a su movimiento. Por lo común, el material es un gas calentado por una reacción química, pero el principio puede aplicarse también al movimiento de un aspersor de jardín.



**2. ESPEJO magnético** que atrapa las partículas de forma que se pueden calentar hasta 10 millones de grados kelvin. Consta de dos electroimanes anulares que establecen un campo magnético, dilatado entre ambos. En el VASIMR, un tercer imán extiende el espejo y proporciona una "tobera" magnética que expulsa las partículas.



**3. CERCA DEL CENTRO** del espejo, las líneas de campo corren paralelas, de forma que la fuerza magnética es radial. Las partículas viajan a velocidad constante con trayectoria helicoidal de radio casi constante.

**4. CERCA DE CADA IMAN**, las líneas de campo se inclinan. Entonces una componente de la fuerza expulsa del imán a las partículas. (Si éstas se mueven hacia el imán, se pueden detener e invertir su movimiento.) En esta zona, la hélice se estrecha.

El empuje del cohete se mide en newtons y es el producto de la velocidad de los gases de escape (con relación a la nave) y la tasa de flujo del agente propulsor. Con bastante sencillez, se obtiene el mismo empuje expulsando más material a velocidad baja o menos a velocidad alta. Este último método ahorra combustible, aunque supone altas temperaturas de los gases de escape.

Para medir las prestaciones del cohete, los ingenieros recurren al impulso específico ( $I_{sp}$ ), expresión que indica la velocidad de los gases de escape dividida por la aceleración de la gravedad al nivel del mar (9,8 metros por segundo por segundo). Aunque el empuje es directamente proporcional a  $I_{sp}$ , la energía necesaria para producirlo es proporcional al cuadrado del impulso  $I_{sp}$ . Por tanto, la energía necesaria para un determinado empuje aumenta linealmente con  $I_{sp}$ . En los cohetes químicos esta energía se origina en la reacción exotérmica del combustible y el oxidante. En otros casos, se debe impartir a los gases de esca-

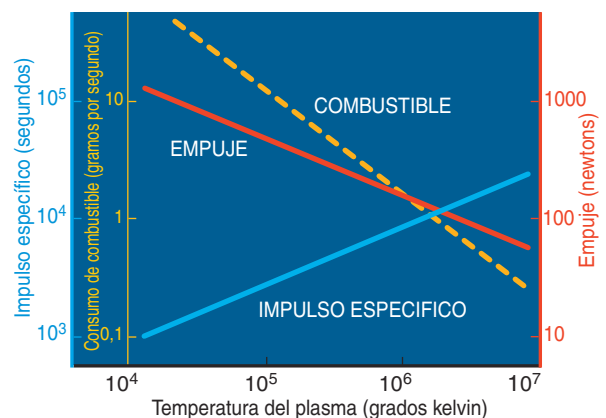
pe por un calefactor del agente propulsor o acelerador. Estos sistemas dependen de una fuente de energía situada en otra parte de la nave. Suelen utilizarse paneles solares; mas la ingente demanda de energía que conlleva la exploración humana del espacio habrá de satisfacerse con reactores nucleares. Sobre todo en misiones allende Marte, donde la luz solar es relativamente débil.

En nuestra búsqueda de un alto rendimiento del combustible, y por tanto de un alto  $I_{sp}$ , mi equipo de investigación ha dejado de lado las reacciones químicas, en las que la temperatura es sólo de unos miles de grados kelvin, para ahondar en las posibilidades de la física de plasmas, donde las altas temperaturas arrebatan a los átomos al-

gunos electrones, si no todos. La temperatura de un plasma comienza aproximadamente a 10.000 grados kelvin. En los laboratorios, sin embargo, ese guarismo puede multiplicarse por 1000. El plasma es una sopa de partículas dotadas de carga: iones positivos y electrones negativos. A estas temperaturas los iones, que constituyen la mayor parte de la masa, se mueven a velocidades de 300.000 metros por segundo, es decir, 60 veces más rápido que las partículas en los mejores cohetes químicos.

La producción de potencia del motor se mantiene adrede en un valor máximo, de forma que el empuje e  $I_{sp}$  son inversamente proporcionales. El aumento de uno de ellos siempre se hace a costa del otro. Por tanto, para el mismo agente propulsor, un cohete de alto  $I_{sp}$  desplaza una mayor carga útil que otro con bajo  $I_{sp}$ , pero en un tiempo más prolongado. Si un cohete pudiese variar el empuje e  $I_{sp}$ , podría optimizar el uso del agente propulsor y desplazar una carga útil máxima en un tiempo mínimo. Esta técnica de aceleración de potencia constante (CPT) es similar a la función de la transmisión de un automóvil al subir una cuesta o a la puesta en bandera de un motor de hélices al moverse a través del aire.

Para representarnos la CPT consideremos el modo en que la nave adquiere energía cinética procedente de los gases de escape. Si este proceso tuviese un rendimiento perfecto, las partículas de los gases de escape (vistas por un observador en tierra) dejarían la nave en reposo; la sonda se movería a la velocidad de los gases de escape. Toda la energía de



**5. COMO EL CAMBIO DE MARCHAS** de un automóvil, y a diferencia de otros cohetes, el VASIMR ajusta su potencia. Incrementando su temperatura, aumenta su impulso específico (azul) y reduce el consumo de combustible (amarillo), a costa de obtener menor empuje (rojo). La potencia de 10 megawatt es constante.



6. MIRANDO por el centro del cohete, se ve el plasma viniendo directamente hacia el observador. La ventana tiene un diámetro de 15 centímetros.

los gases de escape se habría comunicado a la nave. Así, en una nave lenta, los gases de escape lentos utilizan mejor la fuente de energía. Al acelerar la nave, gases de escape más rápidos (calientes), aunque en menor cantidad, dan mejores resultados. Aplicando la CPT, la nave comienza con un empuje alto para lograr una aceleración rápida. Al aumentar su velocidad,  $I_{sp}$  aumenta gradualmente y el empuje disminuye para economizar combustible. No ocurre otra cosa cuando un automóvil arranca en una marcha corta y va paulatinamente cambiando hacia marchas superiores.

### Rebotando de atrás hacia delante

El VASIMR incorpora espejos magnéticos. El más sencillo está producido por dos electroimanes anu-

lares donde la corriente circula en la misma dirección. El campo magnético, confinado cerca de los anillos, se ensancha en el espacio libre entre ambos. Las partículas cargadas se mueven helicoidalmente a lo largo de las líneas del campo, describiendo órbitas alrededor de ellas con un radio específico, el radio de Larmor, y a la frecuencia de ciclotrón. Como es de esperar, para un campo de una magnitud determinada, las partículas más pesadas (los iones) tienen menor frecuencia de ciclotrón y mayor radio de Larmor que las ligeras (los electrones). Además, los campos intensos producen una alta frecuencia de ciclotrón y un pequeño radio de Larmor. En el VASIMR, la frecuencia iónica de ciclotrón es de unos pocos megahertz (MHz), mientras que su equivalente para electrones está en el campo de los gigahertz.

La velocidad de las partículas consta de dos componentes: una paralela al campo (que corresponde al movimiento hacia delante a lo largo de la línea del campo) y la otra perpendicular (propia del movimiento orbital alrededor de la línea). Cuando una partícula se aproxima a un campo limitado (más intenso), aumenta su velocidad perpendicular, pero la paralela se reduce proporcionalmente para mantener constante la energía total. La causa de este fenómeno tiene que ver con la dirección de la fuerza ejercida por el campo sobre la partícula. La fuerza siempre es perpendicular a la velocidad de la partícula y a la dirección del campo. Cerca del centro del espejo, donde las líneas del campo discurren paralelas, la fuerza es radial y no ejerce ningún efecto sobre la velocidad paralela. Pero cuando la partícula entra en la restricción del campo, la fuerza la inclina hacia el exterior de esa zona, produciéndose un desequi-

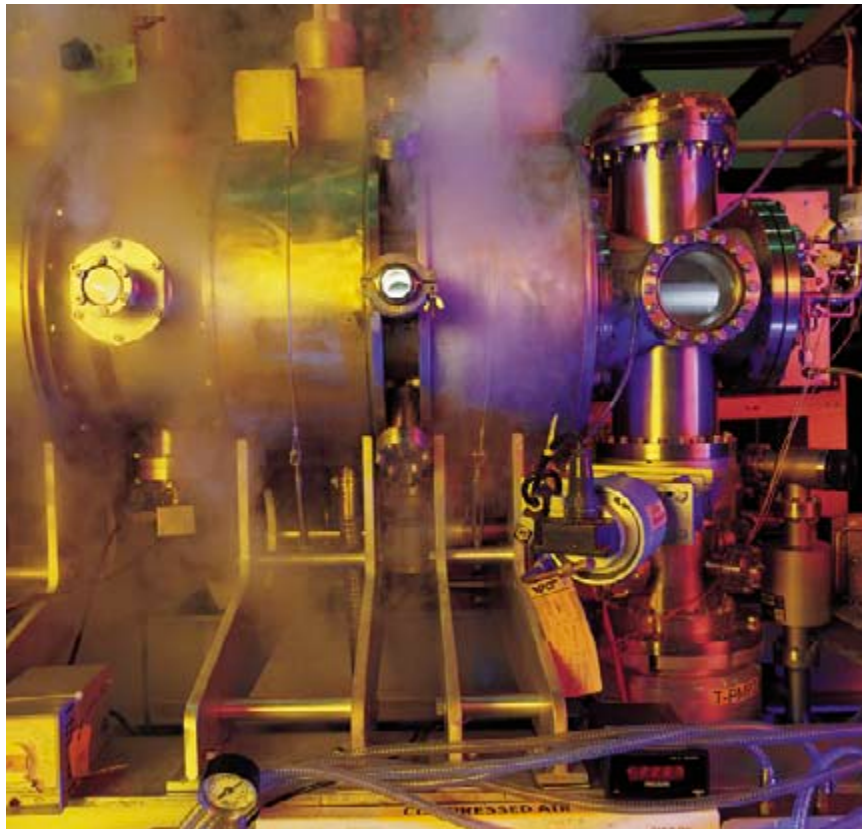
librio que decelera la partícula. Si la partícula está saliendo de la restricción, el campo produce el efecto opuesto y la partícula se acelera. Como no se ha sumado energía, la aceleración ocurre a costa del movimiento rotacional. El campo magnético no opera sobre la partícula; se limita a vehicular la transferencia de energía.

Estos sencillos argumentos se mantienen siempre y cuando la restricción del campo sea lenta y gradual comparada con el movimiento de la partícula, condición conocida como adiabaticidad. En su movimiento curvado alrededor de las líneas del campo, éstas guían a las partículas, que sólo pueden seguir las líneas que no se curvan abruptamente, de forma similar a lo que les sucede a los automóviles que corren raudos por una autopista resbaladiza.

Un espejo magnético puede atrapar partículas si, dada su lentitud, se reflejan en las restricciones del campo. Las partículas rebotan entre sí hasta que algo rompe su velocidad paralela de forma que supera la trampa o hasta que una de las restricciones se reduce. Con una velocidad paralela suficiente, la partícula pasará y se acelerará en el otro lado. Los cambios repentinos en la velocidad de una partícula atrapada, que pueden bastar para liberarla, se pueden producir por sucesos aleatorios (colisiones con otras partículas, interacción con ondas electromagnéticas, o inestabilidades de plasma y turbulencia). El campo magnético de la Tierra es un espejo natural. Las partículas cargadas de la ionosfera rebotan de un lado a otro entre los polos norte y sur. Algunas penetran en las profundidades de la atmósfera superior y crean auroras espectaculares. El VASIMR usa estas tres estructuras magnéticas, unidas conjuntamente: un inyector de plasma delantero, que ioniza el gas neutro; un amplificador de potencia central, que energiza el plasma; y una tobera magnética posterior, que lo impulsa hacia el espacio.

### Dirigiendo la potencia

La mayoría de los cohetes de plasma necesitan electrodos físicos, que se erosionan en un ambiente hostil. Pero el VASIMR utiliza antenas de radio. Las ondas de radio calientan el plasma. Dos procesos de ondas entran en juego. Primeramente el gas neutro en la etapa del inyector se convierte en un plasma denso y, en



7. ONDULANTES NUBES de vapor de agua surgen de los imanes, que se mantienen a la temperatura del nitrógeno líquido.

términos relativos, frío (aproximadamente 60.000 grados kelvin) a través de la acción de ondas helicónicas; así se llaman las oscilaciones electromagnéticas a frecuencias de 10 a 50 MHz, que energizan los electrones libres de un gas en un campo magnético. Los electrones se multiplican rápidamente por la liberación de otros electrones desde los átomos cercanos en una ionización en cascada. Aunque no se dominan los pormenores del mecanismo, estas ondas gozan de extensa aplicación en la industria de semiconductores.

Una vez formado, el plasma fluye hacia la etapa central, donde se calienta por la acción adicional de otras ondas; que en este caso son oscilaciones iónicas de ciclotrón de frecuencia algo menor, cuyo nombre se debe a que resuenan con el movimiento rotacional natural de los iones. El campo eléctrico de la onda es perpendicular al campo magnético externo y gira a la frecuencia iónica de ciclotrón. La resonancia energiza el movimiento perpendicular de las partículas. Este efecto de calentamiento por resonancia iónica de ciclotrón (ICRH) se utiliza ampliamente en las investigaciones sobre fusión.

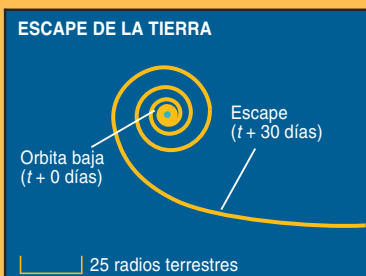
La etapa central, por último, es la responsable del alto  $I_{sp}$  del cohete.

Alguien podría preguntarse por qué un aumento en el movimiento perpendicular de los iones puede impartir una cantidad de movimiento útil a los gases de escape del cohete. La respuesta reside en la física de la tobera magnética, la etapa final del VASIMR. El campo divergente transfiere aquí energía desde el movimiento perpendicular hacia el movimiento paralelo, acelerando los iones a lo largo de los gases de escape. En razón de su mayor masa, los iones arrastran consigo a los electrones, de manera que el plasma sale del cohete como un fluido neutro. En el VASIMR, esta expansión de tobera sucede en una distancia aproximada de 50 centímetros.

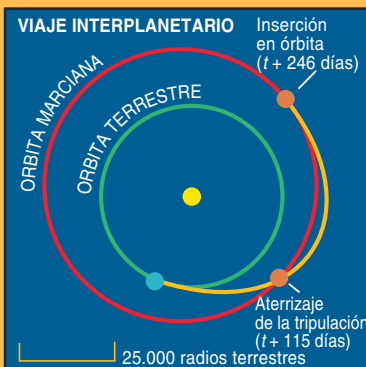
Acabada la expansión, el plasma ha de desprenderse del cohete. En trabajos recientes de Roald Sagdeev, de la Universidad de Maryland, y Boris Breizman, de la Universidad de Texas, hallamos descifrada la física básica. El modelo emplea la velocidad de Alfvén, así llamada en honor de Hannes Alfvén, físico sueco que la describió. Las perturbaciones en un plasma magnetizado se pro-

## TRAYECTORIA DE MARTE

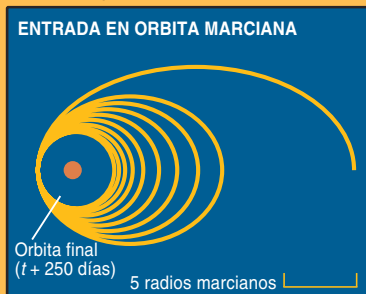
Para llegar hasta Marte, la nave debe liberarse de la gravedad terrestre. Usando una marcha baja (máximo empuje y un  $I_{sp}$  de 3000 segundos), el VASIMR toma velocidad.



A diferencia de los cohetes normales el VASIMR nunca va a la deriva. Cambia a marchas superiores, alcanzando un  $I_{sp}$  de 30.000 segundos a los 75 días de vuelo, y entonces comienza la deceleración.



Después de sobrevolar Marte para dejar a los astronautas, la nave va descendiendo en la órbita por sí misma.



El VASIMR puede regresar si algo va mal al principio del viaje.



pagan a lo largo del campo a esta velocidad. En una tobera magnética la velocidad de Alfvén desempeña un papel similar al de la velocidad del sonido en una tobera normal.

La transición del flujo subalfvénico al superalfvénico define un límite, trascendido el cual el flujo en dirección descendente no ejerce ningún efecto en la dirección opuesta, lo que asegura que el desprendimiento del plasma no oponga resistencia al cohete. La tobera del VASIMR expande el plasma superado este límite, hasta un punto donde el contenido de energía del campo es pequeño comparado con el del flujo de plasma. Entonces se libera el plasma, que arrastra consigo una pequeña cantidad del campo. Se supone que ocurre un fenómeno similar cuando las fulguraciones solares se desprenden del campo magnético del astro. El gasto energético en la distorsión del campo apenas incide en el rendimiento del cohete. El desprendimiento del plasma se produce uno o dos metros más allá de la garganta de la tobera.

### División de la energía

La aceleración que caracteriza al VASIMR se logra cambiando la fracción relativa de energía dirigida a los sistemas de ondas helicón e ICRH. Para alto empuje, la energía se destina a la generación de ondas helicón produciendo más iones a velocidad menor. Para alto  $I_{sp}$ , se desvía más energía hacia el ICRH, con las consiguientes reducciones en empuje. Estamos estudiando otras dos técnicas de variación de los gases de escape, que incluyen un estrangulador magnético en la garganta de la tobera para alto  $I_{sp}$  y un posquemador de plasma para alto empuje con muy bajo  $I_{sp}$ .

Importa atender sobre todo al rendimiento del motor en el curso de su intervalo de funcionamiento. La creación de un plasma de hidrógeno cuesta unos 40 electronvolt por par ion-electrón. (El electronvolt, simbolizado por eV, es la unidad de energía de empleo habitual en física de partículas.) Este gasto de energía no está disponible para la propulsión; la mayoría de ella se aplica a la creación del plasma. A esa inversión inicial hemos de sumar la energía cinética de las partículas, generadora en última instancia del empuje. En el primer prototipo de VASIMR, para un alto  $I_{sp}$ , la energía cinética es aproximadamente 100 eV por ion;

por tanto, un gasto total de energía de 140 eV produce 100 eV de energía útil, vale decir, un rendimiento de entorno al 70 por ciento. En el futuro, el VASIMR alcanzará energías de gases de escape de 800 a 1000 eV para la misma inversión inicial, obteniendo un rendimiento mayor. Para un bajo  $I_{sp}$ , cuando se genera más plasma para buscar un mayor empuje, la energía cinética se acerca a la energía de ionización, con las consecuentes reducciones en rendimiento. Pero el rendimiento habrá que evaluarlo en el contexto general de la misión. En ocasiones, unas breves ráfagas de alto empuje pueden ser el método más eficiente.

El gas de ionización trae consigo otros inconvenientes. Los átomos neutros que quedan en el plasma inicial causan pérdidas de potencia indeseables si permanecen mezclados con los iones energéticos. En un intercambio de carga, un átomo neutro frío cede un electrón a un ion caliente. El neutro caliente resultante no sufre la acción del campo magnético y se escapa, depositando su energía en las estructuras cercanas. El ion frío que deja atrás no sirve para nada.

Con el fin de salvar tal escollo, estamos estudiando una técnica de bombeo radial, en la que se expulsan los neutros fríos hacia fuera, antes de que merodeen en la etapa de amplificación de potencia. Se pueden inyectar nuevamente más abajo de la garganta de la tobera, donde los iones cursan ya en la dirección correcta y el intercambio de carga facilita que el plasma se desprenda del cohete. El intercambio de carga constituye una cuestión central de las investigaciones actuales sobre fusión.

Aunque los helicones ionizan casi cualquier gas, otras razones de índole práctica inclinan a optar por el hidrógeno y el helio, elementos ligeros. En ese sentido, el proceso de ICRH es más sencillo en gases ligeros, cuyas frecuencias de ciclotrón en campos razonables (aproximadamente de una tesla) son compatibles con la técnica de ondas de radio de alta potencia. Afortunadamente, siendo el hidrógeno el elemento más abundante en nuestro universo, cabe esperar que nuestras naves encuentren un amplio suministro de agente propulsor por doquier. En la generación de fuertes campos magnéticos se presenta otro importante desafío para la ingeniería. Estamos investigando nuevos superconductores de alta temperatura, basados en compuestos de