



# DESAFÍOS PARA LA FÍSICA SOLAR DEL

INÉS RODRÍGUEZ HIDALGO

*R. B. Leighton, uno de los descubridores hacia los años sesenta de las oscilaciones solares, afirmó: «Si no tuviera campo magnético, el Sol sería una estrella tan poco interesante como el resto de los astrónomos piensan que es». Se nota que era físico solar... pero al margen de este comprensible sesgo, lo cierto es que sus palabras tienen hoy plena vigencia porque, sin duda, el mayor reto para la física solar del siglo XXI es entender la gran complejidad del magnetismo en el Sol. Un ejemplo de su crucial importancia es que resulta imprescindible un conocimiento satisfactorio del comportamiento solidario del campo magnético y plasma solares (el fenómeno llamado congelación de campo) para aplicarlo —esperemos que en un futuro próximo— al confinamiento de plasmas necesario para producir energía mediante fusión nuclear en la Tierra.*

## CUESTIONES ABIERTAS

El reto genérico que acabo de enunciar se concreta en una serie de cuestiones abiertas que constituyen un desafiante «puzzle». A continuación se enumeran ordenadas, aproximadamente, desde el interior del Sol hasta el medio interplanetario, destacando en negrita las más importantes:

1. **Déficit de neutrinos solares:** los experimentos de detección de neutrinos miden entre un tercio y la mitad de los esperados según los modelos teóricos. La explicación a este problema exige avances en el conocimiento de la física del *neutrino* (todo apunta a que, al menos uno de los tres tipos de neutrinos, muónico, tauónico y electrónico, tiene masa en reposo muy pequeña, pero no nula) y, paralelamente, mejoras en los modelos de estructura solar, actualmente bastante bien establecidos y confirmados por la observación.
2. **Convección:** es el mecanismo de transporte de energía que opera en el último tercio del radio solar. La teoría de convección en laboratorio y la aplicable al plasma solar, así como los modelos y simulaciones de *magnetoconvección*, no son aún suficientemente realistas.
3. **Origen del ciclo de actividad magnética** de unos 11 años, y de sus discontinuidades (como el *Mínimo de Maunder*, periodo de actividad inusualmente escasa entre 1645 y 1715): aún no comprendemos bien el *mecanismo dinamo* que mantiene, amplifica y modifica los cam-

pos magnéticos solares mediante una compleja interacción entre un campo magnético primordial arrollado en forma poloidal en la base de la zona de convección, los movimientos convectivos y la rotación diferencial (a velocidades distintas según la profundidad y latitud) del Sol.

4. **Mecanismos de generación, emergencia, amplificación y destrucción de los campos magnéticos solares:** queda aún mucho por hacer en la descripción y comprensión de estos complejos procesos y sus detalles.
5. **Calentamiento de la cromosfera y la corona:** hoy día parece claro que el campo magnético debe ser el principal responsable, mediante procesos de *reconexión magnética* que tienen lugar en la denominada *alfombra magnética*, una «red» prácticamente ininterrumpida formada por «lazos», que son las estructuras básicas del campo; cada uno de ellos tiene almacenada tanta energía como la que generaría una planta hidroeléctrica en un millón de años, energía que es liberada continuamente en *micro- o nano-fulguraciones*. Como otra contribución a la alta temperatura coronal, aunque menos relevante que la reconexión, se apunta la propagación de *ondas magnetohidrodinámicas*. En cualquier caso, el calentamiento todavía carece de una explicación satisfactoria.
6. **Aparición de inestabilidades magnetohidrodinámicas como fulguraciones y expulsiones de masa coronal** (CMEs, de sus siglas en in-



Inés Rodríguez Hidalgo es investigadora del grupo de Física Solar del IAC y profesora del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna.

glés): además de la investigación básica sobre la física de estos espectaculares y violentos fenómenos, es esencial conocerlos cada vez mejor por su influencia en el entorno de la Tierra (véase el punto 8 de esta lista).

7. **Viento solar:** ¿dónde y cómo se genera y se acelera este continuo flujo de partículas cargadas?

8. **Medioambiente espacial** o «space weather»: se refiere a las condiciones en el Sol (especialmente a las emisiones de partículas cargadas por el viento, fulguraciones y CMEs), la magnetosfera, ionosfera y termosfera, que influyen en el funcionamiento y fiabilidad de los sistemas tecnológicos en Tierra o en el espacio, y que pueden afectar a la vida o la salud humanas. Resulta imprescindible aprender a predecirlo y a calibrar sus consecuencias sobre nuestro modo de vida, cada vez más dependiente de la tecnología espacial.

Afortunadamente, en el reverso del «puzzle» podemos encontrar, si no las instrucciones precisas para solucionar estos problemas, sí algunas indicaciones, como las siguientes:

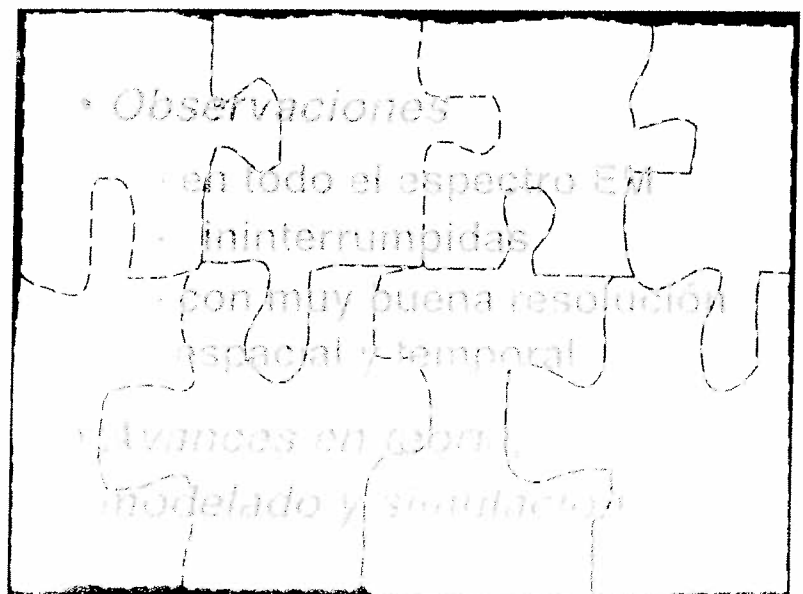
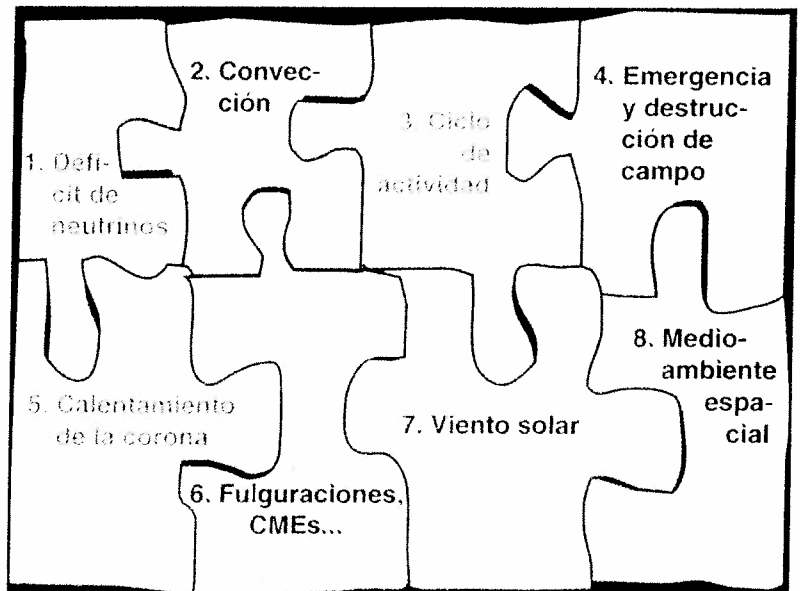
1. Obtener **más observaciones desde el espacio**, para monitorizar la *irradiancia solar* de forma ininterrumpida, acceder a los rangos ultravioleta (UV), X y gamma ( $\gamma$ ) del espectro electromagnético no detectables desde Tierra, y medir directamente el flujo de partículas y energía del viento, fulguraciones y CMEs, y el campo magnético solar, global e interplanetario. Paralelamente, se precisan mejores instrumentos en tierra, ya que en ellos es posible implementar tecnología punta, admiten mayor flexibilidad y son menos costosos. Esto implica construir telescopios de mayor diámetro con *óptica activa y adaptativa* para corregir en tiempo real la degradación por la atmósfera, y *analizadores de polarización* muy precisos, para mejorar nuestra comprensión de las diversas manifestaciones del campo magnético, incluso las más pequeñas y débiles.
2. Continuar y mejorar **los experimentos de detección de neutrinos** y demás instrumen-

tos y estudios en el campo de la *heliosismología*, para avanzar en el conocimiento del interior solar, inaccesible a la observación directa.

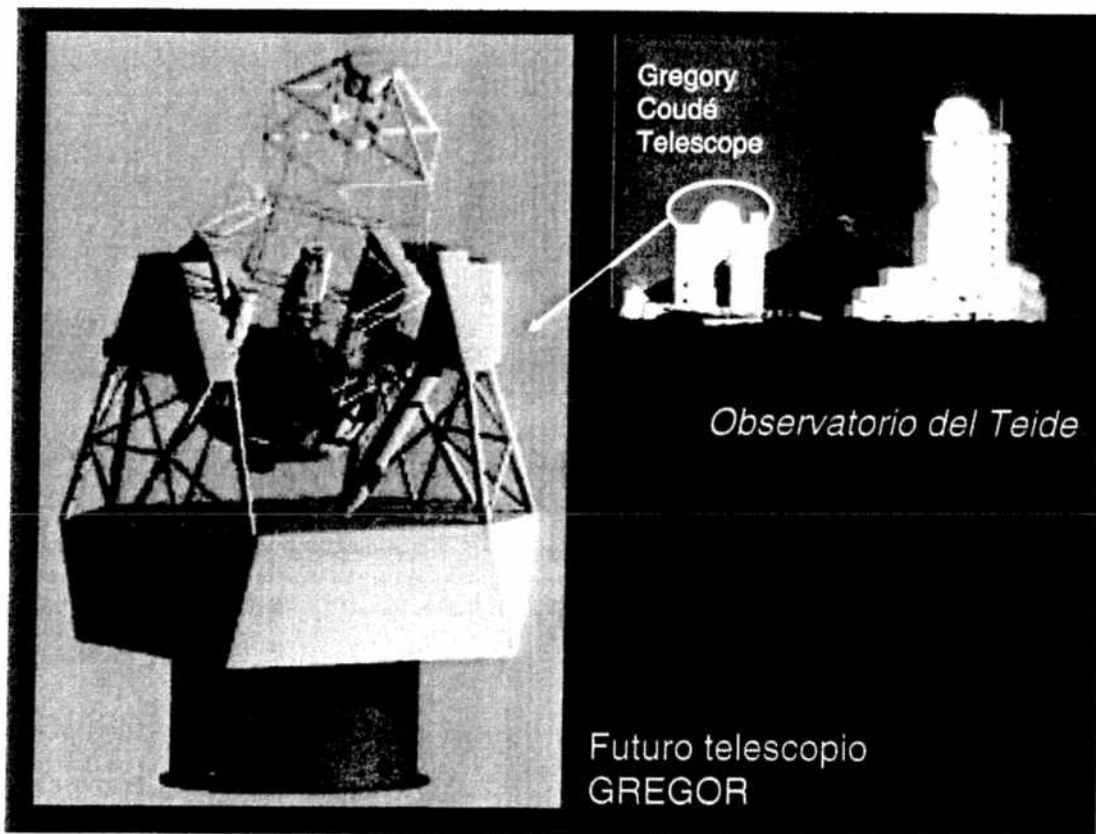
3. **Nuevos desarrollos teóricos** y avances en **técnicas de inversión** (que proporcionan las estratificaciones con la altura en la atmósfera solar de magnitudes físicas como la temperatura, presión, densidad, velocidad del plasma, campo magnético... a partir del espectro electromagnético observado), así como en el **modelado y simulación numérica** cada vez más realista de la convección, estructuras magnéticas particulares, magnetoconvección, la dínamo solar, etc. Todo esto exige cada vez mayor potencia y rapidez de cálculo informático.

4. **Coordinación entre física solar y estelar**, ya que predecir el futuro del Sol a pocos cientos de años vista supone estudiar estrellas de tipo

(Arriba): Puzzle de preguntas cruciales.  
(Debajo): Reverso del rompecabezas anterior.



Futuro telescopio  
GREGOR, sucesor del  
Gregory Coudé  
Telescope en el  
Observatorio del  
Teide.



solar en distintas fases de su evolución. Y también, **coordinación entre física solar y ciencias atmosféricas**, imprescindible en el marco de los estudios del medioambiente espacial.

¿Qué nos depara, pues, el futuro cercano? Se prevén ya ciertos avances cruciales, especialmente en el terreno de la instrumentación, que esperamos nos permitan desvelar los secretos que aún guarda el Sol.

A continuación se mencionan experimentos, telescopios, satélites y proyectos relevantes que ya son realidad o lo serán en las próximas décadas; y si bien la lista no es completa... al menos sí son todos los que están.

#### NUEVOS DETECTORES DE NEUTRINOS

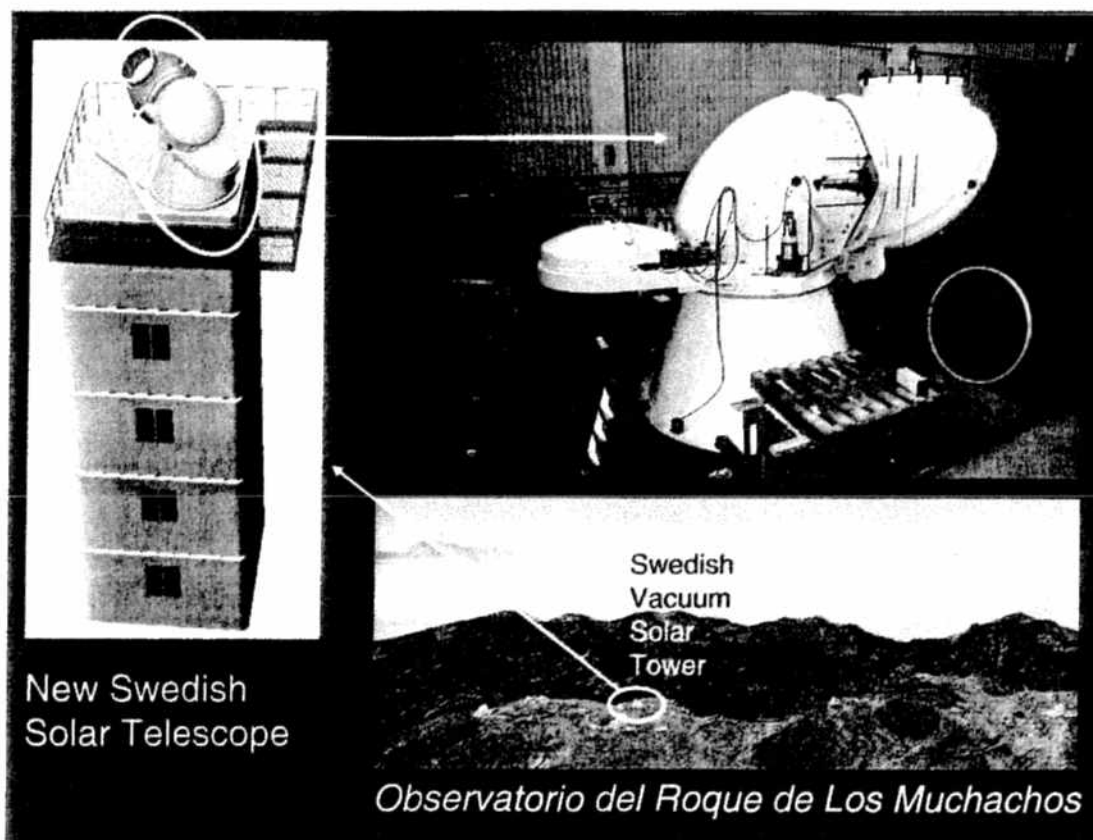
El propósito de estos instrumentos es mejorar la precisión de las medidas aumentando la cantidad de material reactivo y el número y calidad de los detectores. **Kamiokande** (1987-1990) fue sustituido por **SuperKamiokande** en 1996, ambos en la mina de Kamioka, en Japón, donde miles de toneladas de agua pura detectan neutrinos solares de bajas energías procedentes de la cadena protón-protón (p-p) y de altas energías procedentes de la desintegración del  ${}^8\text{Bo}$ .

A **GALLEX** (1991-1997) ha seguido, en la cordillera de Gran Sasso en Italia. **GNO** (de 1998 hasta el fin del próximo ciclo solar), que utiliza

30,3 toneladas de  ${}^{71}\text{Ga}$ , sensible a neutrinos de la cadena p-p y, en la próxima década, **Borexino**, que detectará neutrinos de altas energías procedentes de la desintegración del  ${}^7\text{Be}$  mediante una sustancia «centelleadora» muy pura; por último, **SNO** (operativo desde 1999), en Sudbury (Canadá), con 100 toneladas de agua pesada sensible a neutrinos electrónicos, muónicos y tauónicos.

#### INSTRUMENTOS EN TIERRA

Existen excelentes instrumentos que aún proporcionarán valiosos datos durante años, como **DOT**, en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) de La Palma, un telescopio cuya torre es una estructura totalmente abierta, que viene consiguiendo imágenes de altísima definición; **VTT**, en el Observatorio del Teide (OT) de Tenerife, particularmente adecuado para obtener espectros de muy alta resolución espacial y espectral, equipado además con dos instrumentos desarrollados en el IAC: un **Correlation Tracker** (seguidor-estabilizador de la imagen por correlación) y **TIP**, el **Tenerife Infrared Polarimeter**, que mide con gran precisión el estado de polarización en líneas espectrales infrarrojas; **THEMIS**, también en el OT, telescopio franco-italiano libre de polarización instrumental diseñado especialmente para medidas de campos magnéticos en el Sol; y **GONG**, red mundial de instrumentos heliosismológicos, a la que el OT pertenece.



NSST, que sustituirá a la actual Torre Solar Sueca en el Observatorio del Roque de los Muchachos.

### Advanced Technology Solar Telescope

Plazos previstos para el ATST

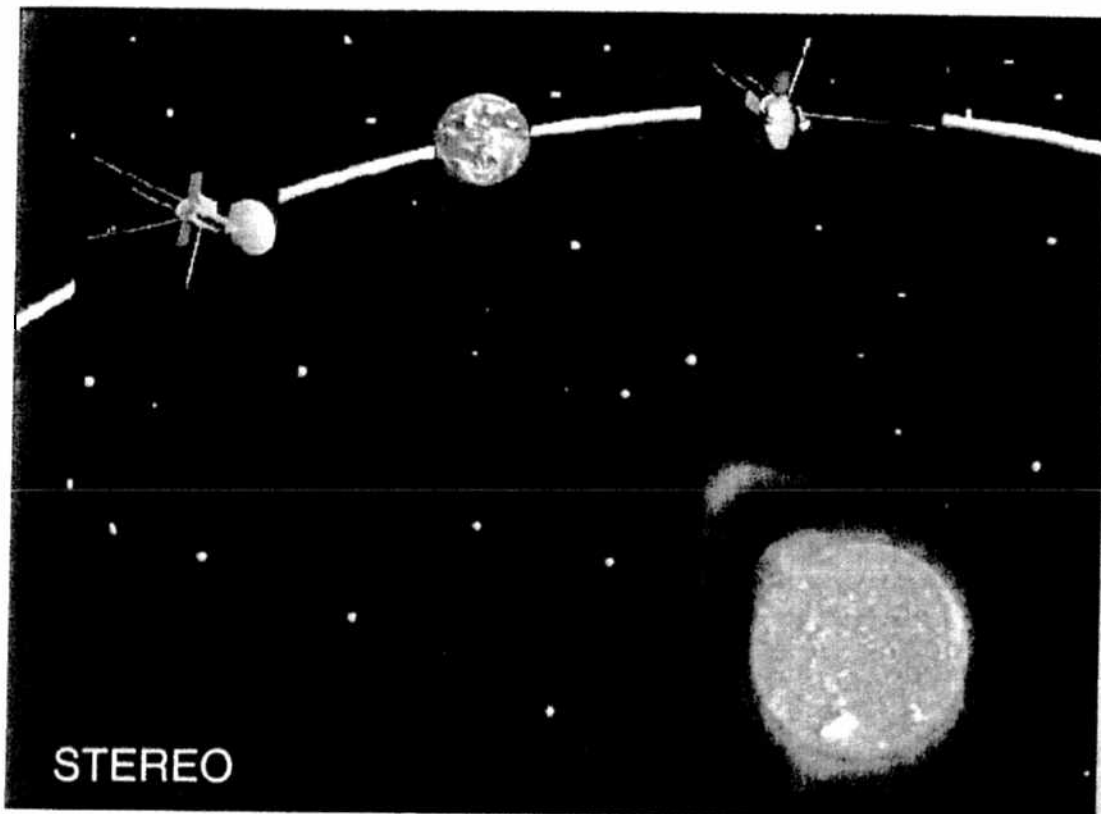
2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Scientific and Technical Advisory Groups										
Site Testing			← Select Candidate Site							
Adaptive Optics Development			← Demonstrate High-Order AO system							
Technology Development										
Concept & Design			CDR →		Construction					
					Integration					
					Operations					

Telescopio Solar de Tecnología Avanzada (Advanced Technology Solar Telescope, ATST), de 4 metros, que será el mayor telescopio solar del mundo. Su ubicación definitiva se decidirá hacia el año 2004 y la isla de La Palma podría ser un firme candidato.

Además son destacables varios proyectos muy innovadores que obtendrán observaciones de muy alta resolución espacial gracias a la óptica adap-

tativa, y realizarán espectropolarimetría de alta precisión. Entre ellos destaca GREGOR (sucesor del actual GCT, del Observatorio del Teide).

Satélites STEREO.

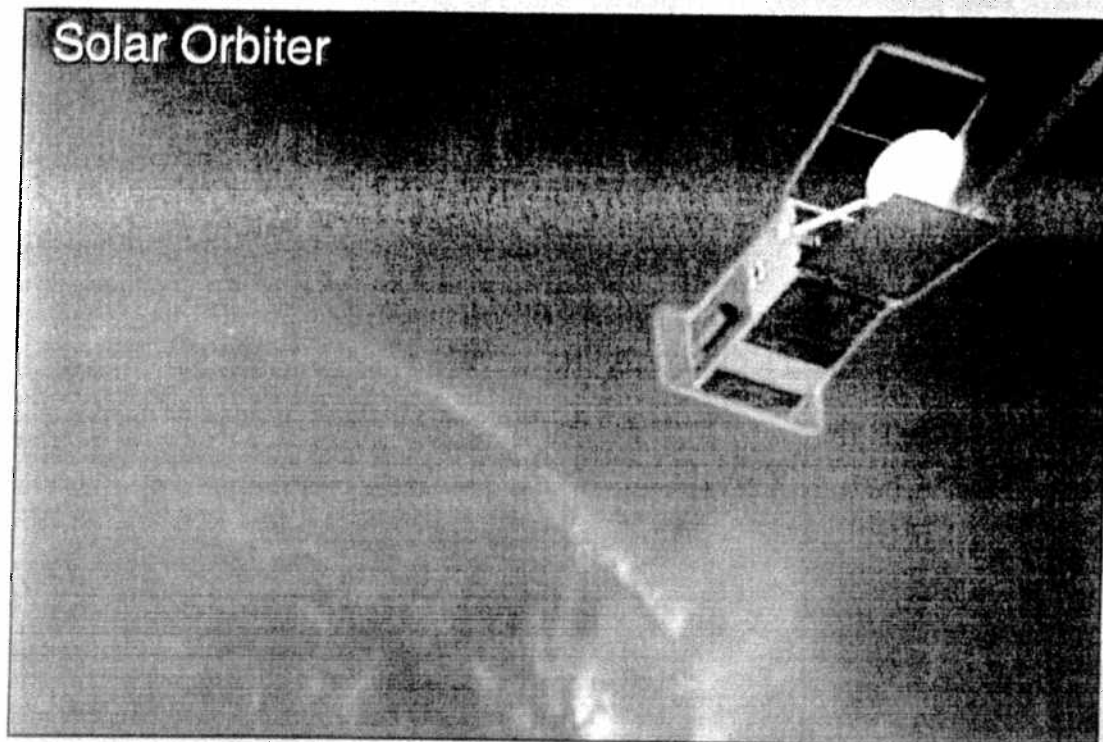


El más ambicioso es, sin duda, el *Advanced Technology Solar Telescope* (ATST —que está previsto para el año 2009 y que es norteamericano sólo, por el momento—), de nada menos que 4 m de diámetro, con óptica activa y adaptativa, así como la más sofisticada instrumentación. Un hecho notable es que los telescopios solares más competitivos siguen viniendo a las Islas Cana-

rias o considerándolas como posible ubicación: la selección del lugar definitivo para ATST se hará en el 2004, y ya se está considerando estudiar La Palma como firme candidato.

#### INSTRUMENTOS EN EL ESPACIO

Existen numerosos satélites actualmente en órbita, como *Ulysses* (desde 1990), primer ins-



El satélite Solar Orbiter, proyecto de la Agencia Espacial Europea aprobado en octubre del 2000.

TABLA

INSTRUMENTO, INSTITUCIÓN o PROYECTO	SIGNIFICADO (LUGAR o INSTITUCIÓN)	ENLACE URL
AIP	Astrophysikalischen Institut Potsdam (Alemania)	<a href="http://www.aip.de/index.html">http://www.aip.de/index.html</a>
ATST	Advanced Technology Solar Telescope (NSF)	<a href="http://www.sanspot.noao.edu">http://www.sanspot.noao.edu</a>
ATST/ Borexino	(LNGS, Princeton University y otros)	<a href="http://almime.mi.infn.it">http://almime.mi.infn.it</a>
DOT	Dutch Open Telescope (ORM, SIU)	<a href="http://www.fys.ruu.nl/~rutten/dot/">http://www.fys.ruu.nl/~rutten/dot/</a>
Home.html ESA	European Space Agency	<a href="http://www.esa.int/export/esaCP/">http://www.esa.int/export/esaCP/</a>
index.html GALLEX	GALLium EXperiment (LNGS, MPIK y otros)	<a href="http://www.mpi-hd.mpg.de/kirsten/">http://www.mpi-hd.mpg.de/kirsten/</a>
gallex.html GCT	Gregory Coudé Telescope (OT, Univ. Göttingen)	<a href="http://www.iae.es/gabinete/oteide/gregory/gregory.html">http://www.iae.es/gabinete/oteide/gregory/gregory.html</a>
GNO	Gallium Neutrino Observatory (LNGS y otros)	<a href="http://www.lngs.infn.it/site/exp/gno/Gno_home.htm">http://www.lngs.infn.it/site/exp/gno/Gno_home.htm</a>
GONG	Global Oscillation Network Group (NSF)	<a href="http://www.gong.noao.edu/">http://www.gong.noao.edu/</a>
GREGOR	(OT, KIS, Univ. Göttingen, AIP)	<a href="http://www.kis.uni-freiburg.de/GREGOR/">http://www.kis.uni-freiburg.de/GREGOR/</a>
HESSI	High Energy Solar Spectroscopic Imager (NASA)	<a href="http://hessi.ssl.berkeley.edu/index.html">http://hessi.ssl.berkeley.edu/index.html</a>
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias (La Laguna)	<a href="http://www.iae.es/home.html">http://www.iae.es/home.html</a>
ISAS	Institut of Space & Astronautical Science (Japón)	<a href="http://www.isas.ac.jp/e/">http://www.isas.ac.jp/e/</a>
JPL	Jet Propulsion Laboratory (NASA)	<a href="http://www.jpl.nasa.gov/">http://www.jpl.nasa.gov/</a>
KIS	Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik	<a href="http://www.kis.uni-freiburg.de/kiswww.html">http://www.kis.uni-freiburg.de/kiswww.html</a>
LMSAL	Lockheed Martin Solar and Astrophysical Lab (EE.UU.)	<a href="http://www.lmsal.com/">http://www.lmsal.com/</a>
LNGS	Laboratori Nazionali del Gran Sasso	<a href="http://www.lngs.infn.it/">http://www.lngs.infn.it/</a>
LWS	Living With a Star (NASA)	<a href="http://sec.gsfc.nasa.gov/lws.htm">http://sec.gsfc.nasa.gov/lws.htm</a>
MPIK	Max Planck Institut für Kernphysik	<a href="http://www.mpi-hd.mpg.de/english/index.html">http://www.mpi-hd.mpg.de/english/index.html</a>
MSFC	Marshall Space Flight Center (NASA)	<a href="http://www.msfc.nasa.gov/">http://www.msfc.nasa.gov/</a>
NASA	National Aeronautics & Space Administration (EE.UU.)	<a href="http://www.nasa.gov/">http://www.nasa.gov/</a>
NSF	National Science Foundation	<a href="http://www.nsf.gov/">http://www.nsf.gov/</a>
NSO	National Solar Observatory	<a href="http://www.nso.noao.edu/">http://www.nso.noao.edu/</a>
NSST	New Swedish Solar Telescope (ORM)	<a href="http://www.astro.su.se/groups/solar/NSST/nsst.html">http://www.astro.su.se/groups/solar/NSST/nsst.html</a>
PPARC	Particle Physics & Astronomy Research Council (UK)	<a href="http://www.pparc.ac.uk/">http://www.pparc.ac.uk/</a>
ORM	Observ. del Roque de Los Muchachos (La Palma)	<a href="http://www.iae.es/gabinete/orm/orm.htm">http://www.iae.es/gabinete/orm/orm.htm</a>
OT	Observatorio del Teide (Tenerife)	<a href="http://www.iae.es/ot/">http://www.iae.es/ot/</a>
SDO	Solar Dynamic Observatory (NASA)	<a href="http://sec.gsfc.nasa.gov/lws_missions_sdo.htm">http://sec.gsfc.nasa.gov/lws_missions_sdo.htm</a>
SIU	Sterrekundig Instituut Utrecht (Holanda)	<a href="http://www.fys.ruu.nl/~wwwstke/extern.html">http://www.fys.ruu.nl/~wwwstke/extern.html</a>
SNO	Sudbury Neutrino Observ. (SNO Institute, Canadá)	<a href="http://sno.phy.queensu.ca/">http://sno.phy.queensu.ca/</a>
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory (ESA, NASA)	<a href="http://sohowww.nascom.nasa.gov/">http://sohowww.nascom.nasa.gov/</a>
Solar B	(ISAS/PPARC/NASA)	<a href="http://www.ssl.msfc.nasa.gov/sslpad/solar/solar-b.htm">http://www.ssl.msfc.nasa.gov/sslpad/solar/solar-b.htm</a>
Solar Orbiter	A High Resolution Mission to the Sun and Inner Heliosphere (ESA)	<a href="http://sci.esa.int/content/news/more.cfm?aid=3&amp;cid=4">http://sci.esa.int/content/news/more.cfm?aid=3&amp;cid=4</a>
Solar Probe	(JPL, NASA)	<a href="http://www.jpl.nasa.gov/ice_fire_sprobe.htm">http://www.jpl.nasa.gov/ice_fire_sprobe.htm</a>
SOLIS	Synoptic Optical Long-term Investigations of the Sun (NSO, NSF)	<a href="http://www.nso.noao.edu/solis/">http://www.nso.noao.edu/solis/</a>
STEREO	Solar TERrestrial RELations Observatory (NASA)	<a href="http://stprobes.gsfc.nasa.gov/stereo.htm">http://stprobes.gsfc.nasa.gov/stereo.htm</a>
Super Kamiokande	(Varias instituciones japonesas)	<a href="http://www-sk.icrr.n-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html">http://www-sk.icrr.n-tokyo.ac.jp/doc/sk/index.html</a>
SVST	Swedish Vacuum Solar Tower (ORM)	<a href="http://www.iae.es/gabinete/orm/svst/svst.html">http://www.iae.es/gabinete/orm/svst/svst.html</a>
TRACE	Transition Region And Coronal Explorer (LMSAL)	<a href="http://vestige.lmsal.com/TRACE/">http://vestige.lmsal.com/TRACE/</a>
VTT	Vacuum Tower Telescope (OT, KIS)	<a href="http://www.kis.uni-freiburg.de/kiswww2.html">http://www.kis.uni-freiburg.de/kiswww2.html</a>
THEMIS	Telescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires (OT)	<a href="http://www.themis.iae.es/">http://www.themis.iae.es/</a>
Ulysses	(ESA/NASA)	<a href="http://www.ssl.msfc.nasa.gov/sslpad/solar/ulysses.htm">http://www.ssl.msfc.nasa.gov/sslpad/solar/ulysses.htm</a>
Yohkoh	«Resplandor» (ISAS/PPARC/NASA)	<a href="http://www.solar.isas.ac.jp/english/index.html">http://www.solar.isas.ac.jp/english/index.html</a>

trumento en observar altas latitudes solares; **Yohkoh** (que significa «resplandor» en japonés, 1991-2003), para estudiar la corona solar en rayos X; el merecidamente mítico **SOHO** (1995-2006), que ha revolucionado nuestro conocimiento del Sol gracias a su batería de instrumentos para estudios heliosismológicos, observaciones en el UV, coronógrafo, viento solar y partículas; o **TRACE** (1999-2004), que observa en el ultravioleta, coordinado con SOHO, con una excelente resolución de unos 350 km por punto de imagen.

Entre los nuevos proyectos destacan: **HESI** (lanzamiento previsto para el 7 de junio del presente año), especialmente dedicado al estudio de las fulguraciones solares combinando espectroscopia e imagen en rayos X y  $\gamma$  con muy alta resolución; **STEREO** (2004-2008), dos satélites gemelos que se moverán uno delante y otro detrás de la Tierra para proporcionar observaciones tridimensionales de la estructura y dinámica de la corona y la heliosfera en el óptico y UV extremo; **Solar B** (2004-2010), sucesor de Yohkoh que observará el Sol en el óptico, UV y rayos X desde una órbita polar heliosíncrona; **Solar Probe** (de 2007 hasta, al menos, 2015) una arriesgada sonda que, con una órbita asistida por la gravedad de Júpiter, se aproximará al Sol hasta tres veces su radio (unos dos millones de kilómetros) para estudiar el viento solar y el calentamiento de la corona detectando radiación óptica, UV extremo, rayos X y partículas, o **SDO**, uno de los instrumentos programados dentro de la iniciativa global *Living With a Star* (ver más adelante).

Mencionemos finalmente el proyecto de ESA **Solar Orbiter** (aprobado en octubre del 2000, con lanzamiento previsto entre 2008 y 2013), sucesor de SOHO y Ulysses. El IAC está involucrado en el diseño y fabricación de su futura instrumentación. Este satélite se situará a unos 45 radios solares (un quinto de la distancia Sol-Tierra), lo que permitirá mejorar la resolución de TRACE en un factor 10, y podrá realizar observaciones desde fuera de la eclíptica para estudiar las propiedades y dinámica del plasma, campo y partículas, así como también de las regiones polares del Sol. El primer congreso sobre este satélite ha reunido en Tenerife en mayo de 2001 a unos 150 científicos expertos en física solar y su instrumentación, al tiempo que el IACG (Inter-Agency Consultative Group), formado por personalidades de las agencias espaciales europea, americana, japonesa y rusa, discutía sobre las futuras misiones para el estudio del Sol.

Dentro de los proyectos espaciales merece mención aparte el **Programa Tecnológico para la Vela Solar**: se trata de un esfuerzo conjunto del *Marshall Space Flight Center* y el *Jet Propulsion Laboratory* de NASA para construir, dentro de los próximos diez o veinte años, un vehículo interestelar que viajará gracias a una vela impulsada por la presión de la luz solar, hecha de un material que pueda ser desplegado en el espacio, ligero, pero capaz de resistir el intenso calor del Sol (probablemente fibra de carbono). La nave alcanzará diez veces la velocidad de la lanzadera espacial en órbita, unos 324.000 km/h. Se está considerando además la posibilidad de utilizar láseres de gran potencia o transmisores de microondas dirigidos hacia la vela durante unas pocas semanas, para proporcionar al vehículo un empuje adicional a la propulsión mediante fotones; este método permitirá llegar a una velocidad de una décima de la de la luz. Está planeado un vuelo de demostración en 2005, seguido de la Sonda Interestelar en 2010. Sin duda, el desarrollo de la vela solar permitirá viajes espaciales que serían imposibles sólo con propulsión química. De todas formas, tomemos esta información con cautela porque, las páginas del *Advanced Space Transportation Program* de NASA (<http://astp.msfc.nasa.gov/astpabout.html>) están todavía en construcción...

Finalmente, existen ambiciosas iniciativas globales como **LWS** (*Living With a Star*), ya aprobada por NASA, que involucra numerosos satélites e instrumentos en tierra, incluyendo ciencia sobre el Sistema Solar, la heliosfera, magnetosfera, ionosfera, alta atmósfera terrestre, etc. De la reciente reunión del IACG ha surgido la recomendación de ampliar el LWS a Internacional LWS; si es aceptada por las agencias espaciales podrán establecerse acuerdos internacionales para la construcción y explotación de muchos de los proyectos mencionados.

## A MODO DE CONCLUSIÓN

Para finalizar, en opinión de numerosos expertos físicos y astrónomos, la historia y reciente desarrollo de la física solar, así como su evolución en las próximas décadas, la definen sin lugar a dudas como una de las áreas más activas y cruciales de la astrofísica moderna. Quienes trabajamos en este campo tenemos fundada esperanza en que los citados avances nos ayudarán a seguir desvelando los «misterios» del Sol a lo largo del siglo que ahora estrenamos.

### NOTA:

Las figuras son cortesía de la autora. Las imágenes de instrumentos han sido extraídas de las páginas Web correspondientes.