



## Les escombraries espacials

L'aportació de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona: el Telescopi Fabra-ROA Montsec (TFRM)

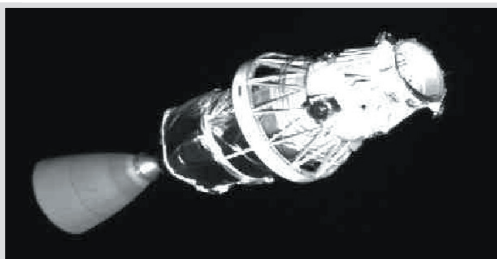
El telescopi Fabra-ROA Montsec (TFRM) a l'Observatori del Montsec. Al fons, el telescopi Joan Oró. (Font: Telescopi Fabra-ROA Montsec)



Els satèl·lits artificials avui dia són presents en la nostra vida fins al punt que depenem gairebé totalment del seu bon funcionament. Disposem de satèl·lits d'observació de la Terra d'alta resolució; satèl·lits meteorològics en òrbita geostacionària (com els Meteosat) i en òrbites baixes (com els MetOp); satèl·lits científics (per a tota mena d'experiments); satèl·lits astronòmics (com el telescopi espacial Hubble); satèl·lits de navegació (com el GPS americà, el GLONASS rus o el futur sistema Galileu europeu) amb infinitat d'aplicacions; satèl·lits de comunicació per a la transmissió d'informació (emissions de TV, telefonia, internet, dades, etc.); satèl·lits de defensa i molts altres. És evident que el correcte funcionament dels satèl·lits té una importància capital i aquests han de trobar-se en les millors condicions i en un ambient no hostil.

És ben conegut que la contaminació afecta molt negativament la terra, els mars i l'atmosfera. És potser menys conegut que la contaminació afecta també l'espai des del primer llançament orbital amb l'Sputnik I el 4 d'octubre de 1957. Des d'aleshores, s'han llençat a l'espai uns deu mil objectes artificials. Alguns satèl·lits, sobretot els situats en òrbites baixes, van decaure a causa del fregament amb les capes altes de l'atmosfera i van tornar a entrar a l'atmosfera i es van cremar. Actualment hi ha més de tres mil satèl·lits en òrbita, però només al voltant de sis-cents estan actius, mentre que la resta s'ha convertit en brossa espacial. Però hi ha també altres objectes, com ara coets llançadors gastats, que han quedat en òrbita. A més, alguns objectes s'han anat trosse-

Una deixalla espacial: l'etapa superior d'un coet llançador Delta II. (Font: U.S. Air Force Research Laboratory's. XSS-10 Satellite, www.dtic.mil/ndia/2003science/engle.pdf)



### Idees clau

- Els satèl·lits espacials tenen una importància cabdal en la nostra vida, però l'augment de la contaminació espacial dificulta la seva tasca i pot provocar greus col·lisions.
- La millor opció, per ara, és la catalogació i el coneixement de les òrbites de la major part d'aquestes deixalles per mitjà de les observacions òptiques amb telescopis de gran camp de visió.
- Des de Catalunya, el telescopi robòtic TFRM de l'Observatori Fabra i el ROA col·laboren en diversos programes internacionals de catalogació i seguiment d'escombraries espacials.

jant a causa de col·lisions, per exemple. Es considera que hi ha més de vint mil objectes en òrbita que tenen deu centímetres o més de diàmetre.

### Què són les escombraries espacials?

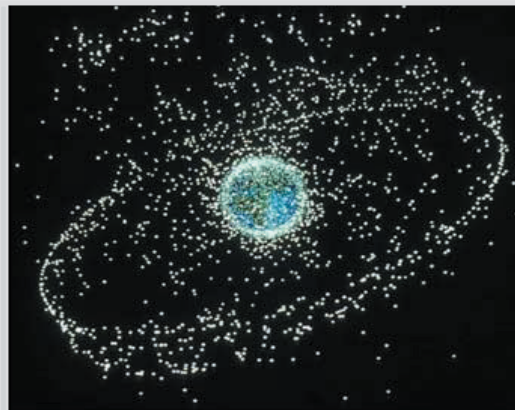
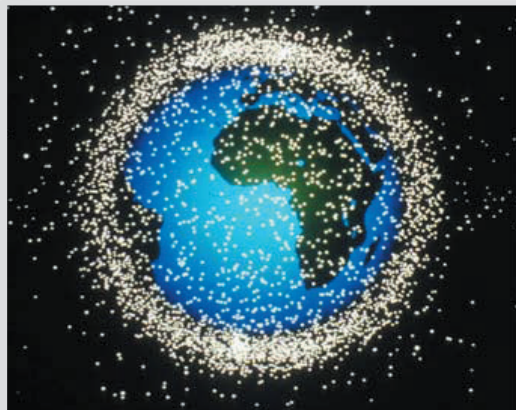
L'Acadèmia Internacional d'Astronàutica (AIA; IAA, en les sigles en anglès) ha definit el terme escombraries espacials en articles del 1993 (*IAA Position Paper on Orbital Debris 1993*) i el 2001 (*Position Paper on Orbital Debris 2001*) com qualsevol objecte d'origen humà no funcional de qualsevol grandària situat en òrbita i sense cap expectativa raonable d'assolir o tornar a assolir la seva funció o qualsevol altra funció de les que es pot esperar que sigui autoritzat a fer.

Aquesta definició inclou, doncs, satèl·lits difunts, etapes finals de coets llançadors, restes de col·lisions i explosions, escates de pintura, partícules deixades pels motors de combustible sòlid, pols, etcètera. Per exemple, entre els satèl·lits difunts, el satèl·lit Vanguard 1 continua en òrbita al cap de cinquanta anys del seu llançament. Les comunicacions amb aquest satèl·lit es van perdre el 1964, però continuarà en òrbita almenys 240 anys més.

### El problema de les escombraries espacials

S'ha reconegut que les escombraries espacials són un perill creixent per a les operacions espacials, actuals i futures, perquè comparteixen les mateixes òrbites que els satèl·lits actius, tant els tripulats com els robòtics. Aquestes òrbites se situen principalment entre els 300 i els 40.000 km d'alçada. La màxima concentració d'aquestes ma-

Distribució de les escombraries espacials catalogades en l'òrbita baixa (LEO) i en la geostacionària (GEO). (Font: NASA Optical Debris Program Office, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photogallery/beehives.html>)



tèries es dona en òrbites baixes (Low Earth Orbit o LEO), on se situa la major part dels satèl·lits funcionals, i en l'anell geostacionari (Geostationary Earth Orbit o GEO, a 36.000 km), reservat als satèl·lits de comunicacions, televisió, meteorològics, etc. També tenen molt d'interès les òrbites intermèdies (Medium Earth Orbit o MEO), situades entre les anteriors, on es localitzen importants satèl·lits, com els de navegació (GPS, GLONASS, Galileo, etc.).

En aquest aspecte, l'òrbita geostacionària és fonamental, ja que els satèl·lits que hi estan situats tenen un període de rotació idèntic al de la Terra i, per tant, estan aparentment immòbils al cel. És evident que qualsevol deixalla espacial situada a prop d'aquesta òrbita presenta un perill especialment greu.

El problema principal de les escombraries espacials és que a les velocitats orbitals (de fins a 20 km/s), qualsevol col·lisió, fins i tot amb un petit cargol, pot ser catastròfica, ja que un petit cargol d'un gram a aquestes velocitats relatives porta més energia cinètica que una bala de fusell. Les escombraries més baixes acaben cremant-se per fregament amb l'atmosfera, però si estan a més de 1.000 km d'alçada poden romandre permanentment en òrbita. També, si són prou grans, poden arribar a terra.

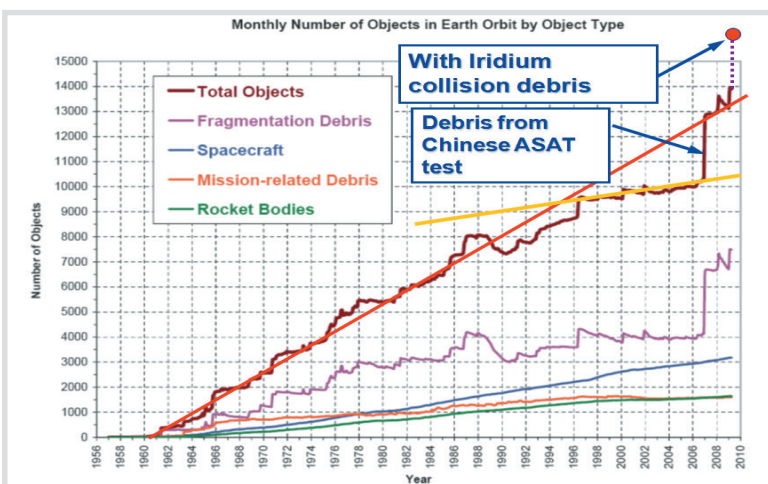
La quantitat d'escombraries espacials no ha parat d'augmentar des del començament de l'era espacial, com indica la línia vermella de la figura inferior,

en què se'n representa el creixement al llarg del temps. Als anys noranta del segle XX es va posar en marxa una iniciativa internacional per a tractar seriosament aquest problema. Aquesta iniciativa sembla que va ajudar una mica a pal·liar-lo, perquè a partir del 1996 el creixement d'escombraries espacials es va alentir, tal com es pot apreciar en la línia groga de la figura anterior.

Diversos esdeveniments entre els anys 2007 i 2009 van crear gran quantitat de noves escombraries: el dia 11 de gener de 2007, la Xina va destruir un satèl·lit meteorològic difunt en una prova militar antisatèl·lit (anomenada Anti-Satellite Test o ASAT) que va produir més de 2.500 noves deixalles; només aquest fet va eliminar els guanys dels deu anys anteriors. Es dona la circumstància que el 22 de gener de 2013, un nanosatèl·lit rus dotat d'un retrorreflector làser anomenat BLITS (Ball Lens in The Space) va col·lidir amb una d'aquestes deixalles i es va trencar en diversos trossos. La col·lisió de dos satèl·lits semblava un fet molt improbable, però la realitat és que a les 16.56 hores del dia 10 de febrer de 2009 els satèl·lits Cosmos 2251 (fora de servei) i Iridium 33 (operatiu) van xocar a una velocitat relativa d'11,7 km/s. En aquesta col·lisió es va generar una gran quantitat de noves escombraries espacials. Només amb aquests dos fets la quantitat d'escombraries espacials ha augmentat d'una manera preocupant. Actualment, com es pot veure en la figura de la dreta, la situació és encara pitjor que la tendència dels anys vuitanta del segle passat.

Un exemple del perill que aquest problema representa és que el 28 de juny de 2011, els astronautes de l'Estació Espacial Internacional van haver de ser evacuats a les naus Soyuz d'escapatoriària per risc de xoc. El fragment de deixalla, descobert sense el temps necessari per a efectuar una maniobra per a esquivar-la, va passar a només 250 m de l'estació.

Fins i tot alguns experts proposen un escenari en què el volum d'escombraries espacials arribaria a un límit tal que les col·lisions amb aquests materials esdevindrien tan freqüents que generarien noves escombraries amb un efecte en cascada. Aquesta generació d'escombraries en cascada, que es coneix amb el nom d'efecte Kessler, provocaria la impossibilitat d'utilitzar l'espai, almenys en determinades òrbites, en les baixes, concretament, i, potser, en la geostacionària, que és, com s'ha comentat, d'una importància fonamental.



Augment d'escombraries espacials, inclou la prova militar xinesa i la col·lisió Iridium 33 - Cosmos 2251. (Font: NASA Orbital Debris Quarterly News, <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/newsletter/pdfs/ODQNV18i1.pdf>.)

## El control de les escombraries espacials: es poden eliminar?

Com s'ha comentat, el fregament amb l'atmosfera elimina, amb el temps, les escombraries espacials que es troben en òrbites baixes però no pas les que estan en òrbites més altes. A més d'aquest efecte, els acadèmics i els organismes governamentals, per a solucionar la qüestió de les deixalles espacials, han proposat plans com:

– **El control de l'increment.** Aquest control inclou mesures com ara canviar el disseny dels llançadors per a evitar explosions; establir un tractat internacional per a minimitzar les deixalles espacials; publicar directrius voluntàries; establir «regles del camí» internacionals per a prevenir col·lisions entre satèl·lits; establir pràctiques estàndard per a satèl·lits civils i militars; elaborar un estàndard ISO per a la mitigació de les deixalles espacials i establir una política que tingui en compte el passat i el futur (*one-up, one-down*) de llicències de llançament per a les òrbites de la Terra de manera que per a cada llançament es pagaria un cànon sobre la captura i la desòrbita d'una deixalla d'aproximadament el mateix pla orbital.

– **L'autoeliminació.** Actualment, els satèl·lits destinats a l'òrbita geostacionària porten un sistema per a «aparcar-los en una òrbita cementiri», però aquestes òrbites no protegeixen suficientment els objectes. S'ha proposat que tots els satèl·lits portin un sistema que permeti que quan se'ls acaba la seva vida útil la seva òrbita decaigui fins a la reentrada a l'atmosfera. Aquest decaïment es pot fer d'una manera activa, amb coets per a baixar la posició del perigeu de l'òrbita, o d'una manera passiva, amb correntes electromagnètiques, desplegant veles de gran superfície o inflant grans globus lleugers.

– **L'eliminació externa.** Una possible solució és la de llançar naus robòtiques perquè busquin escombraries espacials i les capturin. Una possibilitat és la d'adherir un sistema propulsor per a conduir la deixalla a una òrbita cementiri o a una òrbita baixa amb la finalitat que es cremin a l'atmosfera. Aquesta opció requereix la difícil, cara i lenta maniobra d'anar a trobar la deixalla. Una altra possibilitat és fer servir l'*escombra làser* per a dirigir des de l'espai un làser a la part davantera de la deixalla, de manera que actuant com un petit retrocoet la freni i l'acosti a l'atmosfera o la dirigeixi cap a una òrbita cementiri. Un inconvenient d'aquesta tècnica és la possibilitat de trencar parts de l'objecte, amb la qual cosa es produïrien noves deixalles.

Les diverses propostes esmentades presenten problemes tals com: a) la manca actual de tecnologia; b) l'elevat cost que representaria desenvolupar aquesta tecnologia, ja que el cost de qualsevol d'aquestes solucions és aproximadament el mateix que el del llançament d'una nau espacial i, d'acord amb experts de la NASA, no és rendible econòmicament, i c) l'absència d'incentiu comercial, ja que el cost de l'eliminació no està assignat a l'entitat que produeix el problema. Aquests importants problemes han impedit que actualment la majoria dels enfocaments tecnològics esmentats s'hagin convertit en projectes finançats.

## Observacions mitjançant radar i òptiques. Els programes internacionals d'SSA/SST

Veiem, doncs, que la tecnologia actual no permet la retirada de les deixalles espacials; per això la millor opció, per ara, és la catalogació i el coneixement de les òrbites de la major part d'aquestes deixalles, de manera que sigui possible predir amb suficient antelació l'acostament de les deixalles als satèl·lits actius i a les estacions tripulades per tal que es pugui efectuar una maniobra d'evasió en el cas que l'acostament pugui resultar perillós. Aquestes maniobres d'evasió avui dia es fan sistemàticament en l'operació dels satèl·lits, tant els no tripulats com els de l'Estació Espacial Internacional.

En el cas d'òrbites baixes, l'observació mitjançant radars és eficient i permet fer la catalogació dels objectes, però l'eficiència del radar disminueix amb la quarta potència de la distància; per tant, a partir d'uns 1.000 km d'alçada l'eficiència disminueix i fa que a partir de 2.000 km els radars no siguin útils i les observacions òptiques siguin les més adients. En concret, l'observació amb radar no és útil per a l'òrbita geostacionària pel fet que està a massa distància de la Terra i, per aquest motiu, les observacions òptiques amb telescopis de gran camp de visió són les més utilitzades.

Conscients de la necessitat de protegir l'espai de les escombraries espacials, els Estats Units, la Unió Europea, Rússia i el Japó i l'Agència Espacial Europea (ESA) i la NASA tenen programes de control de les escombraries. Concretament, els Estats Units i la NASA disposen del NASA Orbital Debris Program Office, dedicat a la catalogació, el control i la mitigació dels riscos de les escombraries espacials. D'una manera similar, la Unió Europea i l'ESA disposen de l'Space Situational Awareness (SSA), del qual forma part l'Space Surveillance and Tracking - SST Segment (SST), dedicat a la catalogació i el seguiment de les deixalles espacials i a alertar els operadors dels satèl·lits quan pugui caldre fer una maniobra d'evasió.

Recentment, la Unió Europea, considerant la qüestió de les escombraries espacials és d'interès estratègic i basant-se en noves competències en temes espacials, ha llançat una sèrie d'iniciatives dins el programa Horizon 2020, específicament dedicada a l'SST, i és previst el llançament d'un programa marc de suport a l'SST i, a partir del 2018, un nou programa emblemàtic dedicat a SST, amb un elevat pressupost. Espanya participa en aquestes activitats amb el programa anomenat Spanish SST (S3T), finançat pel Ministeri d'Indústria, Energia i Turisme i dedicat al desenvolupament d'un nou radar i a la integració dels actius observacionals existents.

## L'aportació de la Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona. El Telescopi Fabra-ROA Montsec (TFRM)

Com s'ha indicat abans, la millor manera de trobar i catalogar escombraries espacials a les òrbites altes (MEO i GEO) és mitjançant imatges òptiques preses amb telescopis òptics de gran camp de vi-

sió. Els satèl·lits i les escombraries espacials apareixen a les imatges òptiques com objectes que es mouen molt ràpidament respecte a les estrelles que apareixen a la mateixa imatge.

La Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona (RACAB) per mitjà de l'Observatori Fabra participa activament en els programes SST internacionals amb el Telescopi Fabra-ROA Montsec (TFRM). L'origen del TFRM es remunta a alguns anys enrere, quan el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) i la RACAB, responsable de l'Observatori Fabra situat al vessant del Tibidabo, van emprendre la tasca de recuperar una càmera Baker-Nunn que posseïa el ROA per a, convenientment actualitzada i modernitzada, establir un punt d'observació que millorés les prestacions de l'Observatori Fabra que, després de més de cent anys de servei, havia de complementar-se amb un telescopi situat lluny de la contaminació lumínica de la ciutat. El projecte va ser possible gràcies a les aportacions de les mateixes institucions i del Ministeri i del Departament de la Generalitat de Catalunya corresponents. La càmera, rebatejada com a Telescopi Fabra-ROA Montsec, està instal·lada des del setembre de 2010 a l'Observatori Astronòmic del Montsec (OAdM), a 1.570 m d'alçada, al costat del telescopi Joan Oró, propietat de la Generalitat de Catalunya.

El TFRM és, per tant, la transformació per observació CCD (càmera electrònica) d'una càmera Baker-Nunn de 50 cm d'obertura fabricada per la NASA, que es va dissenyar a finals dels anys cinquanta del segle XX, precisament per al seguiment de satèl·lits artificials. Aquesta circumstància fa que el TFRM sigui ideal per a l'observació d'escombraries espacials gràcies al seu gran camp de visió ( $4.4^\circ \times 4.4^\circ$ ), que equival a 100 vegades la superfície lunar, per la seva relació focal (distància focal / obertura del telescopi), que és 0,96, és a dir, extremament lluminosa, la qual cosa permet fer exposicions més curtes funcionant de manera totalment robòtica. Actualment el TFRM treballa cada nit en mode robòtic operat i controlat conjuntament per l'Observatori Fabra i el ROA.

Cada imatge del TFRM ocupa  $4.096 \times 4.096$  píxels i conté milers d'imatges d'estrelles i/o d'escombraries espacials. El TFRM pot observar satèl·lits i escombraries en qualsevol òrbita gràcies al seu sistema de seguiment capaç de moure el telescopi adaptant-se a la velocitat de l'objecte. En la figura del costat es poden observar detalls d'imatges que mostren observacions de satèl·lits GEO, MEO i LEO respectivament.

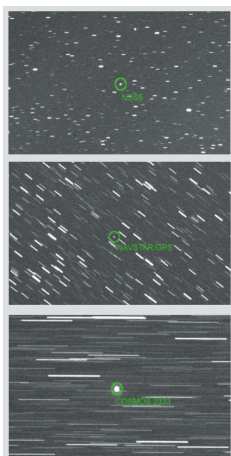
Gràcies a la capacitat d'observar en totes les òrbites i de manera totalment robòtica, el TFRM participa, d'ençà que es va inaugurar, en diversos programes de detecció (*surveillance*) i seguiment (*tracking*) d'escombraries espacials. Concretament, el TFRM participa o ha participat en:

a) la xarxa International Scientific Optical Network (ISON), coordinada pel Keldysh Institute de l'Acadèmia de Ciències de Rússia. L'ISON té fins similars al programa SSA/SST, de l'ESA, amb l'objectiu d'operar una xarxa de telescopis òptics per a detectar i seguir objectes i escombraries espacials dèbils situades en les òrbites geocèntriques altes; b) les campanyes CO-VI i CO-VIII de l'ESA / SST de l'ESA, que consisteixen a fer observacions de seguiment (CO-VI) i detecció (CO-VIII) a l'anell GEO i proporcionar a l'ESA les posicions dels objectes detectats; c) el posicionament astromètric precís i el seguiment d'altres objectes orbitals d'interès; d) el Demonstration Test-Bed for the Remote Control of an Automated Follow-Up Telescope de l'ESA, amb l'objectiu de demostrar la capacitat europea per a la construcció dels telescopis i programari de control i anàlisi, d'un sistema observacional per a la total implementació del programa SSA/SST, i e) la proposta d'un sistema espanyol d'SST per a la Unió Europea, amb la finalitat de participar en un futur programa europeu de suport a l'SST ja esmentat. L'objectiu del programa és demostrar la capacitat actual d'Espanya de generar una cadena/model de serveis d'SST.

A tall d'exemple, l'any 2014 el TFRM va dedicar un total de 85 nits a escombraries espacials, i va fer la detecció automàtica de 18.723 objectes (*tracks*) i 130.000 posicions. Cal destacar que totes les deteccions es van fer en mode vigilància i, per tant, sense cap coneixement previ de les òrbites.

## Conclusions

Els satèl·lits espacials tenen una importància cabdal en la nostra vida, en tots els aspectes. Per tal que puguin dur a terme la seva tasca d'una manera correcta, els satèl·lits han de treballar en un ambient tan amigable com sigui possible. Però la contaminació provocada per l'home ja fa anys que afecta l'espai amb més de 20.000 objectes orbitals inútils de més de 10 cm de diàmetre i amb centenars de milers d'objectes, que, tot i que són més petits, tenen una capacitat destructora molt elevada. Com que la tecnologia actual no permet retirar les deixalles espacials, la millor opció, per ara, es la catalogació i el coneixement de les òrbites de la major part d'aquestes deixalles. L'observació amb radar no és útil per a l'òrbita geostacionària, ja que està massa lluny de la Terra i, per aquest motiu, les observacions òptiques amb telescopis de gran camp de visió són les més utilitzades. Una aportació des de Catalunya a la mitigació d'aquest problema és la participació del telescopi robòtic TFRM de l'Observatori Fabra i el ROA en diversos programes internacionals i, concretament, europeus de catalogació i seguiment d'escombraries espacials amb l'objectiu de col·laborar a l'establiment del sistema europeu SST.



De dalt a baix, detall d'imatges de satèl·lits GEO, MEO i LEO. Les imatges GEO i MEO tenen cinc segons d'exposició, i la LEO, un segon d'exposició. Les estrelles surten allargades perquè el telescopi segueix el satèl·lit.  
(Font: Telescopi Fabra-ROA Montsec)