

Perché e come ridurre la grande quantità di detriti spaziali

di Clelia Iacomino, Mattia Pianorsi, Aristeia Saputo*

Il crescente numero di oggetti spaziali in LEO (orbita bassa terrestre), ossia lo spazio compreso entro i 2000 km dalla superficie della Terra, rappresenta una minaccia per la sostenibilità a lungo termine dell'ambiente spaziale, aumentando il rischio di collisione tra satelliti attivi e detriti spaziali.

Negli ultimi anni, l'attenzione internazionale sul tema è cresciuta, soprattutto dopo il recente episodio riguardante il test russo anti-satellite (Anti Satellite Weapons-ASAT) avvenuto nel novembre 2021. Un dispositivo russo anti-satellite ha distrutto un satellite russo, creando migliaia di frammenti che ora viaggiano ad alta velocità nelle orbite terrestri, aumentando ulteriormente il rischio di nuove collisioni e un conseguente incremento del volume dei detriti stessi.

Altre nazioni, compresi gli Stati Uniti e la stessa Russia, avevano già condotto test ASAT. Nel 2007, un test cinese ha distrutto il satellite meteorologico Fengyun 1C, generando più di 3400 frammenti; un'operazione simile è stata condotta dall'India nel 2019, quando il lancio inaspettato di un missile anti-satellite ha suscitato sorpresa (e qualche allarme) tra gli esperti internazionali e nell'industria aerospaziale. Tale lancio, denominato Mission Shakti, ha colpito un satellite indiano in LEO provocando detriti e facendo dell'India il quarto Paese con capacità di distruggere satelliti (dopo Stati Uniti, Russia e Cina). Un'altra possibile causa di detriti può derivare dalla collisione acciden-

* **Clelia Iacomino** è Junior Research Fellow di Business Government Relations e ricercatrice presso il SEE Lab di SDA Bocconi.

Mattia Pianorsi è Junior Researcher presso il SEE Lab di SDA Bocconi. **Aristeia Saputo** è Lab Researcher presso il Sustainability Lab, l'AGRI Lab e il SEE Lab di SDA Bocconi.

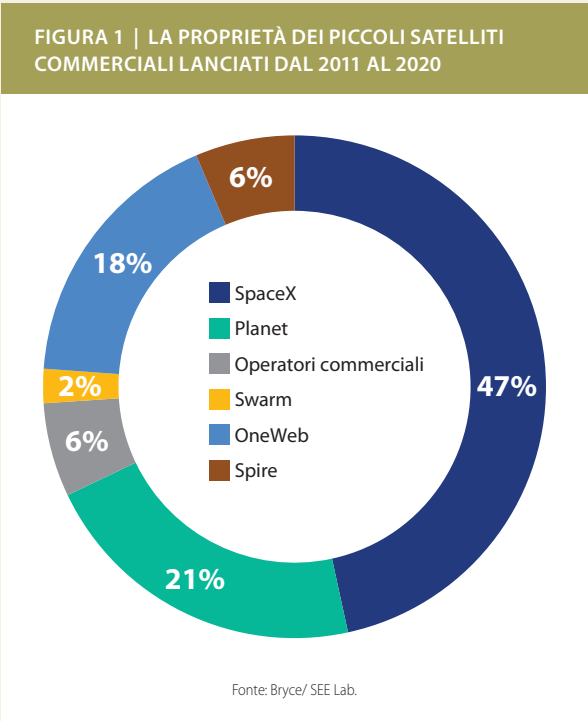


© SHUTTERSTOCK - VLADWEL

TABELLA 1 | ATTIVITÀ E DETRITI SPAZIALI IN NUMERI

Numero di lanci dall'inizio dell'era spaziale	Circa 5400
Numero di satelliti lanciati nell'orbita terrestre dall'inizio dell'era spaziale	Circa 8900
Numero totale di satelliti nell'orbita terrestre a oggi	Circa 5000
Numero di satelliti attivi	Circa 1900
Numero di detriti tracciati dal US Space Surveillance Network	Circa 23200
Numero stimato di incidenti, esplosioni e collisioni causati dai detriti	Più di 5000
Totali degli oggetti spaziali nell'orbita terrestre	Circa 8400 tonnellate
Numero di detriti nell'orbita terrestre	34.000 detriti > 10 cm di diametro 900.000 da 1 cm a 10 cm di diametro 128 milioni da 1 mm a 1 cm di diametro

Fonte: «The Space Economy in Figures How Space Contributes to the Global Economy», OECD, 2019.



tale tra satelliti attivi, come quella avvenuta nel 2009 che ha coinvolto Iridium 33 (Stati Uniti) e Cosmos 2251 (Russia), e che ha causato la dispersione di circa 2300 frammenti. Altri frammenti provengono, infine, da esplosioni o collisioni, guasti anomali e rotture con cause sconosciute.

IL PROBLEMA DEI DETRITI

A oggi, secondo le stime dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) riportate nel documento «Annual Space Environment», nell'orbita terrestre ci sono circa 34.000 detriti superiori a 10 cm di diametro, 900.000 da 1 cm a 10 cm e 128 milioni da 1 mm a 1 cm (Tabella 1). In aggiunta, sebbene il traffico spaziale sia

destinato ad aumentare per il progressivo dispiegamento di mega-costellazioni satellitari commerciali in orbita LEO (ossia gruppi di centinaia di satelliti che operano in modo coordinato per offrire una copertura della superficie terrestre completa), non esiste ancora una regolamentazione vincolante per la gestione di tali satelliti. Contrariamente, l'orbita geostazionaria (GEO), a 36.000 km dalla superficie terrestre, essendo fondamentale per il posizionamento dei satelliti spia e di telecomunicazione, è stata sottoposta a regolamentazione.

Oggi, il repentino aumento dei detriti spaziali sta diventando un problema imprescindibile non solo per le istituzioni internazionali, ma anche per le società private. Di fatto, come effetto di un quadro normativo inadeguato per la gestione dei satelliti al termine del ciclo operativo, si è assistito ad un'impennata nella formazione di frammenti che minacciano le future operazioni in orbita e le attività terrestri che si basano su di esse, nonché la ricerca scientifica legata allo spazio.

GLI ATTORI PRIVATI

Il lancio delle mega-costellazioni satellitari in LEO da parte di aziende private è aumentato esponenzialmente negli ultimi due anni (2019-2020), peggiorando gli scenari futuri in materia di detriti. Infatti, il numero di satelliti attivi e defunti in LEO è cresciuto di oltre il 50 per cento, arrivando a circa 5.000 oggetti.

Come mostra la Figura 1, l'83 per cento dei 2050 satelliti di piccole dimensioni lanciati dal 2011 al 2020 sono di proprietà di cinque operatori commerciali.

Il dispiegamento di satelliti per le telecomunicazioni nel 2020 è cresciuto del 477 per cento rispetto al dispiegamento record di 175 satelliti dello stesso tipo registrato nel 2019. Tale aumento è riconducibile principalmente alle attività di due società, OneWeb e SpaceX. La prima, infatti, ha lanciato 358 satelliti, che costituiscono ora più della metà della sua mega-costel-

© Egea SpA - TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI

lazione; la seconda ha posizionato, invece, 955 satelliti Starlink. Per quanto riguarda l'osservazione della Terra, dopo un lancio di 48 SuperDove nel gennaio 2021, Planet gestisce ora una mega-costellazione di oltre 437 satelliti attivi.

Come anticipato, attualmente non esiste un quadro normativo vincolante per l'orbita LEO in riferimento alla gestione degli oggetti spaziali al termine della loro vita utile. Infatti, le istituzioni pubbliche hanno fornito solo linee guida sulle attività di *de-orbiting* (cioè la rimozione degli oggetti spaziali dall'orbita bassa terrestre a conclusione delle loro attività), nel tentativo di ridurre il problema dei detriti spaziali. Nonostante negli ultimi anni vi sia stato un leggero aumento nel numero di operatori che si attengono a queste linee guida, sia intervenendo attivamente per rimuovere i propri satelliti sia tramite il decadimento naturale degli oggetti. Il decadimento naturale rappresenta una opzione percorribile quando le caratteristiche del satellite e dei parametri iniziali sono tali da permettere un tempo di *de-orbiting* inferiore ai 25 anni.

La percentuale di attori che non adottano tali misure è ancora alta per tutti i tipi di missioni: amatoriali, di difesa, commerciali e civili. La Figura 2, per esempio, mostra la quota di operatori satellitari che rispettano la regola volontaria dei 25 anni, ossia l'indicazione di deorbitare gli oggetti spaziali presenti in LEO entro 25 anni dal termine delle loro missioni.

COME MITIGARE I DETRITI ORBITALI

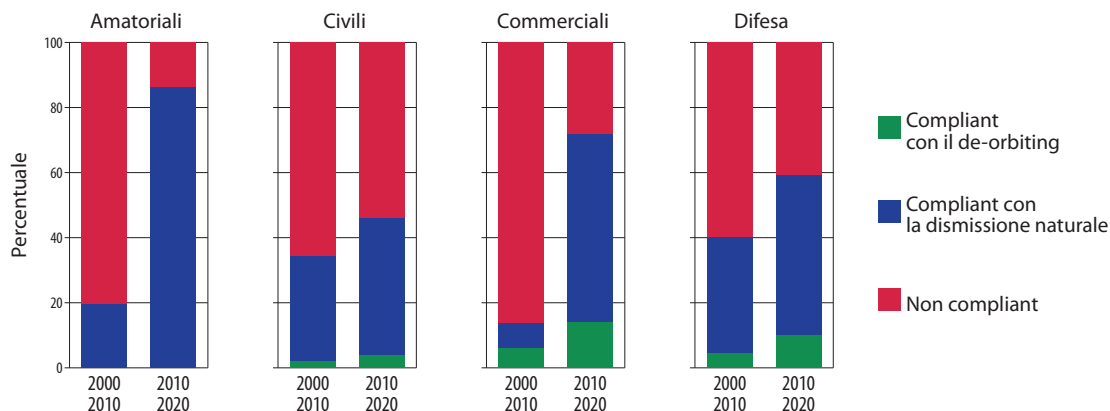
Le misure di mitigazione dei detriti spaziali hanno una lunga storia. Originariamente sviluppate nel 1995 dagli Stati Uniti nelle linee guida della NASA, sono state successivamente aggiornate nel 2001 e nel 2019. Indicazioni simili sono state sviluppate dalla

Commissione delle Nazioni Unite sull'Uso Pacifico dello Spazio Extra-atmosferico (COPUOS), con il supporto del Comitato di Coordinamento Inter-agenzie per i Detriti Spaziali (IADC), e sono state adottate nel 2007. Insieme alle 21 linee guida per la sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali, queste ultime formano una serie di misure che gli Stati membri del COPUOS e le organizzazioni internazionali possono seguire volontariamente per preservare l'ambiente spaziale.

Nonostante la comunità internazionale abbia fatto molta strada nella mitigazione dei detriti spaziali negli ultimi dieci anni (a livello nazionale e internazionale), ci sono ancora diverse sfide tecniche e politiche da affrontare. In particolare, le più importanti riguardano¹:

- il rispetto delle linee guida internazionali e delle disposizioni nazionali. Attualmente la conformità a tali indicazioni da parte degli attori pubblici e commerciali non è sufficiente, soprattutto in LEO;
- la responsabilità di terzi. Sebbene la rimozione degli oggetti spaziali obsoleti o di frammenti attraverso uno strumento di smaltimento esterno agli oggetti stessi, il cosiddetto Active Debris Removal (ADR) sia ancora in fase di sviluppo, questioni legali irrisolte pongono diverse incertezze sul fatto che una terza parte possa rimuovere il satellite di proprietà di un altro Stato o di un'altra società. Infatti, molti Stati considerano l'interferenza con le proprie risorse o capacità spaziali come minaccia nazionale. Molte di queste minacce si presentano sotto forma di test ASAT, che possono essere utilizzati per interrompere o distruggere le risorse spaziali straniere. Anche se le operazioni ADR non sono intrinsecamente attività ASAT, molte delle tecnologie e delle tecniche utilizzate al fine di rimuovere i detriti spaziali po-

FIGURA 2 | QUOTA DI CONFORMITÀ IN TERMINI DI SGOMBERO DEI SATELLITI IN LEO PER TIPO DI MISSIONE



Fonte: Ambiente spaziale annuale dell'ESA.

trebbero anche essere utilizzate per danneggiare o distruggere un satellite.

Negli ultimi tempi c'è stato un lungo dibattito internazionale che ha coinvolto rappresentanti governativi e delle industrie spaziali sulle misure di mitigazione dei detriti e, in particolare, in riferimento alla regola dei 25 anni. La discussione è sorta principalmente in risposta all'aumento delle mega-costellazioni disposte in LEO, composte da satelliti con vita utile breve. Molti attori appartenenti alla comunità spaziale hanno lamentato che 25 anni di permanenza in orbita sono un termine di tempo troppo lungo da concedere per la rimozione di satelliti inattivi, che sono in definitiva pericolosi detriti spaziali. Hanno dunque chiesto di ridurre tale periodo a 5 o 10 anni, sebbene non vi sia largo consenso su quale dovrebbe essere l'arco di tempo esatto. I detrattori della modifica, invece, denunciano l'aumento dei costi legati alla rimozione dei satelliti in tempi più brevi (principalmente riconducibili alla spesa addizionale per il carburante). Tuttavia, questa impostazione potrebbe rivelarsi economicamente conveniente se dimostrasse di poter evitare, nel lungo termine, i costi legati alle collisioni.

Per concludere, le attuali linee guida per la mitigazione dei detriti spaziali sono seguite da una frazione ridotta degli operatori satellitari, i quali non percepiscono ancora alcun incentivo (per esempio economico) per adeguarsi. Infatti, l'attuazione di misure di mitigazione può assumere un senso economico se: 1) si verifica un aumento del rischio di collisione e dell'impatto delle collisioni sui satelliti attivi nel breve e medio termine; 2) l'adozione di misure di mitigazione si traduce in un aumento delle vendite grazie a una mi-

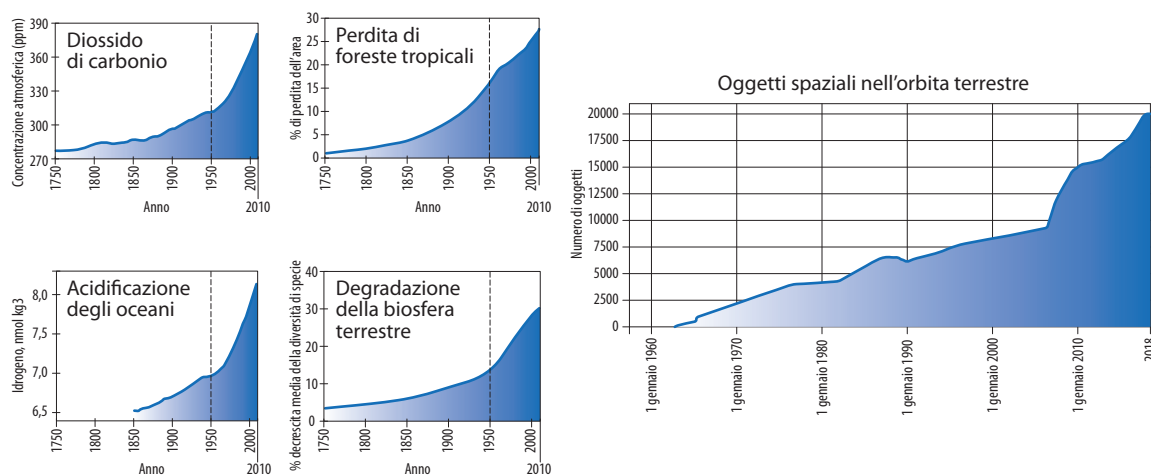
gliore immagine pubblica. Inoltre, è importante considerare che i regolamenti volontari possono generare fenomeni di *free-riding* e soffrire le conseguenze di una scarsa capacità di monitoraggio e di una mancanza di trasparenza.

ECOSISTEMI E ORBITE COME RISORSE COMUNI

Gli ecosistemi naturali terrestri e le orbite spaziali si somigliano sotto diversi punti di vista. Per prima cosa, entrambi possono essere definiti «risorse comuni», in quanto chiunque può accedervi ed è complicato escludere qualcuno dai benefici che essi generano. Al contempo, in entrambi i casi, l'attuale sovrautilizzo può ostacolare la possibilità delle generazioni future di godere di tali risorse. Sia l'ambiente terrestre sia quello spaziale sono infatti minacciati da comportamenti irresponsabili di singoli operatori che optano per strategie vantaggiose a livello privato, ma che non corrispondono all'*optimum* sociale. Inoltre, così come i fattori di stress ambientale sulla Terra (per esempio, la concentrazione di anidride carbonica, la perdita di foreste tropicali o l'acidificazione degli oceani) stanno aumentando esponenzialmente, si prevede che anche il numero di detriti spaziali crescerà con un ritmo esponenziale (Figura 3). Nonostante ciò minacci le future attività spaziali, le risposte da parte dell'uomo sono ancora troppo sporadiche e, come nel caso della gestione delle risorse comuni terrestri, le iniziative solo pubbliche o solo private devono essere superate in vista di strategie più collaborative che coinvolgano tutte le parti interessate.

Il Trattato sullo spazio extra-atmosferico, entrato in vigore nel 1967, stabilisce che ogni Stato può accede-

FIGURA 3 | FATTORI DI STRESS AMBIENTALE E CRESCITA DEI DETRITI SPAZIALI



Fonte: T. Maury, P. Loubet, M. Trisolini, A. Gallice, G. Sonnemann, C. Colombo, «Assessing the Impact of Space Debris on Orbital Resource in Life Cycle Assessment», *Science of the Total Environment*, 2019.

re allo spazio e che nessuno può precludere agli altri di esplorarlo e di godere delle sue risorse, stabilendo, dunque, l'ambiente extra-atmosferico come bene comune.

Il concetto di beni comuni ha origine negli studi di un economista britannico, Wallace Foster Lloyd, che lo introdusse per la prima volta nel 1833 per descrivere come le attività di pascolo non regolamentate stessero intaccando le terre comuni. Tuttavia, il termine ha guadagnato maggiore popolarità più di un secolo dopo grazie all'ecologista americano Garrett Hardin, che nel 1968 scrisse della «tragedia dei beni comuni»². Hardin sosteneva che possa accadere che le risorse comuni a cui tutti possono accedere senza alcun criterio di sfruttamento, come i bacini di pesca o i pascoli, siano sovraconsumate rispetto all'*optimum* sociale. Ciò avviene poiché gli individui sono incentivati a sfruttarle finché i benefici marginali, che sono privati, superano i costi marginali, che sono, invece, condivisi con tutta la comunità. Tale sovrautilizzo può essere condotto da alcuni utenti non solo a spese di altri, ma anche della conservazione della risorsa.

L'idea dei beni comuni è stata poi ulteriormente raffinata dal premio Nobel per l'economia Elinor Ostrom, che li ha etichettati come «common-pool resources», aggiungendo tale categoria alla tradizionale classificazione dei beni secondo la dicotomia «privato-pubblico». Le risorse comuni sono simili ai beni pubblici in quanto è difficile escludere i potenziali beneficiari dal loro sfruttamento, mentre sono più vicine ai beni privati in quanto il loro utilizzo da parte di alcuni individui riduce la possibilità di altri di goderne.

Appare ora chiaro come le orbite si inseriscano in questo quadro teorico di riferimento. Esse possono essere etichettate come risorse comuni poiché è difficile impedire a qualcuno di occupare un posto in un'orbita, ma un uso eccessivo può ridurre i benefici che tutti ne traggono. In primo luogo, una volta che un oggetto occupa una posizione in un'orbita, questo non può essere utilizzato da un altro; in secondo luogo, anche alla fine della loro vita utile, molti oggetti spaziali vengono lasciati vagare in orbita, dove diventano una minaccia per le attività degli altri operatori. Si può, dunque, pensare a un processo che riduce gradualmente i benefici che tutti possono trarre dalle orbite tramite il sovraccollamento e il crescente rischio di incidenti.

IL FENOMENO DEL *FREE-RIDING*

Di solito, coloro che beneficiano delle risorse comuni non hanno incentivi ad adoperarsi per preservarle, a meno che un principio organizzativo condiviso non lo imponga. Infatti, poiché nessuno ha un diritto di proprietà esclusivo sulla risorsa comune e poiché il degrado della risorsa avviene gradualmente, gli utenti

non sono stimolati a internalizzare i costi della loro cattiva condotta. Nel caso, invece, in cui solo alcuni tra i beneficiari adottino misure di preservazione della risorsa comune, come avviene oggi nell'orbita terrestre, si assiste al fenomeno del *free-riding*, ossia la circostanza in cui alcuni individui non contribuiscono al mantenimento della risorsa, pur continuando a goderne. Il *free-riding* è una strategia privatamente vantaggiosa che non corrisponde, però, alla strategia socialmente ottimale. Attualmente, solo una parte limitata degli attori che beneficiano delle orbite si prende cura della loro conservazione (per esempio, solo circa la metà dei satelliti in LEO sono deorbitati in non più di 25 anni dopo la fine delle loro operazioni, come suggerito dalle linee guida internazionali), il che significa che alcuni attori stanno adottando una strategia da *free-rider*. Poiché i rischi legati alle collisioni tra satelliti non sono ancora percepiti come urgenti e non ci sono leggi che impongono di gestire i detriti spaziali, gli utenti delle orbite non hanno alcun incentivo a farsi carico di costosi servizi di rimozione.

LA TIRANNIA DELLE PICCOLE DECISIONI

Nel 1966, l'economista americano Alfred E. Kahn introdusse il concetto di «tirannia delle piccole decisioni» per descrivere «una situazione in cui una serie di piccole decisioni, individualmente razionali, cumulativamente si traduce in un risultato più grande che non è né ottimale né desiderato e può cambiare negativamente il contesto delle scelte successive, fino al punto in cui le alternative desiderate sono irreversibilmente distrutte»³. Questa idea, che Kahn propose come causa ricorrente dei fallimenti del mercato, è stata successivamente estesa ad altri ambiti, come il degrado ambientale, le elezioni politiche o i risultati sanitari.

Nel 1982 l'ecologista William Odum notò come gran parte della confusione e dell'angoscia, di cui fu testimone, riguardo alle questioni ambientali poteva essere ricondotta a decisioni che non erano necessariamente prese consapevolmente, «ma semplicemente risultanti da una serie di piccole decisioni»⁴. In effetti, come per i fallimenti del mercato, il degrado ambientale spesso deriva da decisioni di molti attori, che non sono direttamente volte a danneggiare gli ecosistemi, quindi «inconsapevoli», ma i cui risultati cumulati generano esternalità negative. Esempi possono essere l'inquinamento dell'aria o degli oceani, così come il degrado del suolo o la deforestazione, o molti altri danni agli ecosistemi. Il concetto di tirannia delle piccole decisioni può essere esteso anche ai detriti spaziali. Nessuno degli attori che beneficiano delle orbite terrestri ha l'obiettivo specifico di accumulare detriti, ma la mancanza di incentivi economici, previsti da azioni regolamentative

delle istituzioni pubbliche, per assumersene la responsabilità porta a decisioni individuali che generano un risultato indesiderato.

Nonostante gli ecosistemi terrestri e le orbite condividano diverse caratteristiche, vi è una differenza fondamentale. Infatti, da un lato, gli impatti cumulativi degli agenti inquinanti che si accumulano negli ecosistemi terrestri evolvono secondo interazioni ecologiche complesse e ancora parzialmente sconosciute (basti pensare a quanto poco è stato compreso fino a oggi sulla relazione tra ecosistemi marini e le sostanze rilasciate delle attività industriali), dall'altro, la probabilità di collisioni dei satelliti è almeno parzialmente prevedibile, così come la conseguente generazione di frammenti e l'aumento della probabilità di ulteriori collisioni. Tale prevedibilità non lascia spazio all'interpretazione per quanto riguarda la rilevanza della questione e potrebbe aiutare i soggetti coinvolti a intervenire tempestivamente per preservare l'integrità delle orbite per le generazioni attuali e future.

PUBBLICO VS PRIVATO?

A metà del XX secolo, gli economisti consideravano due forme organizzative principali, il mercato e lo Stato; ma già nella seconda metà del secolo alcuni studiosi, come Elinor Ostrom, hanno sostenuto che tale approccio dicotomico non rendesse conto di una vasta gamma di accordi istituzionali che gli esseri umani avevano adottato fino a quel momento per gestire le risorse comuni. Il paradigma «mercato-Stato» non è esaustivo anche per quanto riguarda le possibili soluzioni al problema dei detriti spaziali, in quanto gli approcci che si basano solo su uno dei due poli, libero mercato o istituzioni pubbliche, incontrano diversi ostacoli o risultano inefficienti.

Le soluzioni tradizionali alla gestione dei beni comuni che si basano solo sull'intervento dei privati si sono dimostrate inefficaci. L'attuale livello di inquinamento dell'aria e degli oceani può servire come indicatore significativo di tale fallimento. In effetti, da una prospettiva di mercato, condizioni che implicano costi diretti e benefici indiretti sono destinate a fallire poiché il loro costo marginale supera i benefici marginali.

D'altra parte, le soluzioni tradizionali che si basano solo su interventi pubblici includono, per esempio, linee guida volontarie, sistemi di comando e controllo, diritti di proprietà o tasse, ma nessuna di queste sembra essere una soluzione definitiva al problema dei detriti spaziali. Come già evidenziato, finora le istituzioni pubbliche hanno emesso solo indicazioni volontarie per quanto riguarda la gestione dei detriti spaziali; tuttavia, coerentemente con la dinamica del *free-riding*, i dati sullo stato attuale dell'orbita bassa dimostrano che solo un numero limitato di operatori spaziali rispetta

tali raccomandazioni, in quanto non esistono incentivi a sostenere la spesa delle misure di mitigazione.

In alternativa, le istituzioni pubbliche potrebbero insistere sui diritti di proprietà come base per assegnare la responsabilità dei detriti spaziali. Infatti, poiché il problema del *free-riding* emerge quando i beneficiari di una risorsa comune non internalizzano i costi del suo mantenimento, esso può essere contrastato stabilendo diritti di proprietà e responsabilità. I diritti di proprietà permettono di identificare coloro il cui diritto è minacciato o violato e coloro che hanno causato il danno e che dovrebbero sostenere i relativi costi. Ciononostante, definire i diritti di proprietà su porzioni di spazio (come per un terreno di pascolo), può porre alcuni problemi. Per prima cosa, tale risoluzione violerebbe il Trattato sullo spazio extra-atmosferico, secondo cui «lo spazio extra-atmosferico non è soggetto ad appropriazione nazionale per rivendicazione di sovranità, per mezzo di uso o occupazione, o con qualsiasi altro mezzo». Inoltre, l'identificazione di criteri e mezzi per la determinazione dei diritti di proprietà potrebbe presentare difficoltà pratiche (per esempio, l'identificazione di un volume fisico di spazio su cui applicare i diritti di proprietà). Allo stesso tempo, il Trattato sullo spazio extra-atmosferico, la Convenzione sulla responsabilità spaziale e la Convenzione sulla registrazione degli oggetti lanciati nello spazio suggeriscono già che gli Stati debbano essere considerati responsabili di tutte le attività spaziali nazionali, siano esse svolte da attori governativi o non governativi. In particolare, la Convenzione sulla registrazione degli oggetti lanciati nello spazio è stata approvata nel 1976 per fornire alle nazioni un meccanismo per identificare gli oggetti spaziali e assumersene la responsabilità. Di conseguenza, esse sono responsabili di qualsiasi danno causato dai loro oggetti spaziali. Tuttavia, sebbene queste norme forniscano un quadro di responsabilità che chiama gli Stati all'azione in caso di incidente, non indicano se e come ci si aspetta che essi prevenivano le collisioni. D'altro canto, però, è interessante notare che il Trattato sullo spazio extra-atmosferico specifica che lo spazio debba essere utilizzato in modo da rimanere a disposizione di tutti («Gli studi e le attività non dovrebbero essere condotti in modo da creare interferenze potenzialmente dannose con altri Stati»). Così, se l'accumulo di detriti fosse considerato come un'interferenza potenzialmente dannosa, gli Stati sarebbero incoraggiati ad assumersene la responsabilità, sia per prevenire gli scontri sia per evitarne l'aumento.

Tuttavia, come sostenuto dall'avvocata Chelsea Muñoz-Patchen, quando si considerano piccoli detriti spaziali, essi sono difficilmente riconoscibili e il loro proprietario non può essere identificato con certezza. D'altra parte, i proprietari di detriti spaziali più grandi

e identificabili possono essere facilmente identificati, ma, come visto sopra, attualmente non hanno incentivi economici per assumersi la responsabilità di spostarli dall'orbita bassa. Inoltre, in entrambi i casi far ricadere l'onere dei detriti sui proprietari degli oggetti spaziali può scoraggiare l'iniziativa da parte di terzi di intervenire con soluzioni alternative, in quanto esposti a possibili incidenti diplomatici.

Infine, poiché coloro che abbandonano una proprietà impongono un costo alla società, i governi potrebbero affrontare il problema imponendo una tassa sui detriti, al fine di far internalizzare agli operatori il costo delle esternalità che generano e inducendoli a prendere decisioni socialmente ottimali riguardo al numero di lanci e alla gestione degli oggetti non più attivi. Inoltre, tale scelta potrebbe finanziare un servizio di pulizia dell'orbita comune. Ciononostante, emerge qualche dubbio sulla capacità degli Stati di determinare una tassa pigouviana (cioè una tassa sulle attività di mercato che generano esternalità negative e il cui costo non è incluso nel prezzo di mercato) per i detriti spaziali, poiché i governi potrebbero non avere abbastanza informazioni per definire una multa ottimale da imporre agli operatori interessati.

Di conseguenza, si può affermare che né meccanismi solo privati né quelli solo pubblici forniscono una soluzione per la gestione dei detriti spaziali. Come già sostenuto da diversi studiosi rispetto alle risorse comuni della Terra, per la gestione dei detriti spaziali è necessario un intervento combinato di attori privati e istituzioni pubbliche (possibilmente includendo anche tutti gli altri portatori di interesse delle orbite). Infatti, anche se formalmente indipendenti, gli operatori pubblici e privati interagiscono e dipendono l'uno dall'altro per quanto riguarda la possibilità di godere dei benefici di orbite pulite.

IL POTENZIALE DI RISCHIO DI COLLISIONE

Al fine di validare tali ipotesi, è giusto domandarsi se gli operatori satellitari all'interno di un libero mercato possano risolvere autonomamente il problema dei detriti spaziali. Vale a dire, esiste un incentivo economico per gli operatori satellitari ad applicare e finanziare tecnologie di mitigazione del rischio di collisione o sono necessari regolamenti vincolanti e il sostegno finanziario delle istituzioni pubbliche per superare le sfide dei detriti spaziali?

Per rispondere a tale quesito, il SEE Lab di SDA Bocconi School of Management, in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), ha condotto uno studio «Economic Theory Applied to Space Debris Scenarios» per esplorare la prospettiva economica degli operatori satellitari privati sull'adozione di misure di mitigazione del rischio di collisione. Infatti, una comprensione più approfondita delle valutazioni economiche legate alle pratiche di mitigazione può fornire indizi utili riguardo alle potenzialità di diffusione di tali attività ed eventualmente incoraggiare collaborazioni pubblico-private per accelerare il processo

e migliorare l'osservanza delle linee guida internazionali sui detriti spaziali.

L'analisi si è concentrata sull'orbita bassa terrestre, dove il numero di oggetti è in rapido aumento e dove ci si aspetta la maggior parte delle collisioni, e ha considerato un periodo di tempo di 150 anni a partire dal 2021. Il CNR italiano ha utilizzato il modello evolutivo SDM 5.0 per valutare le probabilità di collisione e l'efficacia delle misure di mitigazione nel ridurle. Il primo passo della ricerca è stata la stima della crescita de-

gli oggetti spaziali in LEO nei prossimi decenni, come conseguenza dei futuri lanci dalla Terra e delle collisioni in orbita. Più specificamente, al fine di comprendere i potenziali rischi di collisione, il CNR ha sviluppato diversi scenari in base alla probabilità di collisione tra satelliti attivi e detriti spaziali e all'efficacia di una selezione di tecnologie di mitigazione. Le tecnologie di interesse sono il cosiddetto post-mission disposal (PMD) e l'active debris removal (ADR), che rientrano nella categoria delle "attività di trasferimento". Per attività di trasferimento si intende la modifica dell'orbita di un satellite con lo scopo di portarlo su orbite più alte per il ritiro EOL (*end-of life*), per eseguire un rientro controllato di satelliti in LEO o per recuperare satelliti bloccati in seguito a una manovra o a causa di un guasto del veicolo di lancio. Le tecnologie PMD e ADR possono prevenire ulteriori detriti (de-orbitando oggetti spaziali) o ridurre il numero di detriti (rimuovendo detriti già esistenti) nello spazio. Le soluzioni PMD consentono di sfruttare parte del propellente del satellite per manovrarlo lontano dall'orbita bassa, una volta conclusa la sua attività, in modo da non causare interferenze con altri satelliti. In questo caso, l'operatore satellitare deve scegliere se giustificare il costo del carburante per de-orbitare il satellite prima della fine



© SHUTTERSTOCK - VLADWEL

della sua vita utile o conservare il propellente per altri obiettivi di missione. Le soluzioni ADR, invece, comportano l'attracco e la rimozione di un detrito spaziale tramite uno strumento esterno. Se gli operatori satellitari non applicano il PMD, il maggiore impiego di ADR sarebbe rivolto a compensare tale inadempienza.

Come mostrato nella Figura 4, nel modello evolutivo del CNR, lo scenario di riferimento (linea blu) comprende le misure di mitigazione standard comunemente adottate al giorno d'oggi con i relativi livelli di conformità (ed è, per tale motivo, denominato «business-as-usual»). Nello scenario di riferimento, il numero di collisioni ammonterà a circa 270 nel 2170, ma se gli operatori satellitari applicheranno le misure di mitigazione con la combinazione di PMD e ADR il rischio che tali eventi si verifichino si abbassa. Come previsto, l'impiego della tecnologia ADR migliora significativamente la situazione portando a una riduzione del 10 per cento circa del numero finale di oggetti più grandi di 5 cm, sia nello scenario C1 ADR (ossia in abbinamento a un aumento del tasso di adozione della norma dei 25 anni) sia nello scenario C2 ADR (ossia in corrispondenza a un aumento del tasso di adozione della regola dei 5 anni). Al contempo, l'impegno dell'ADR provoca una riduzione dell'11 per cento circa del numero complessivo di collisioni per il caso C1 ADR e del 15 per cento circa per il caso C2 ADR.

IL MODELLO DI ATTRATTIVITÀ

A partire dai risultati dell'analisi del CNR sugli effetti di mitigazione della combinazione di PMD e ADR, il SEE Lab ha valutato il livello di attrattività di tali soluzioni considerando i rischi a esse correlati.

Il modello del livello di attrattività analizza il contesto in cui opera un'azienda per valutare come fattori esterni e interni a essa (rispettivamente aspetti ambientali e industriali) influenzino la scelta di utilizzo di una tecnologia. Il livello di attrattività più alto indica il segmento di business più valido in cui investire.

Gli elementi ambientali includono due fattori: il rischio normativo, che descrive i possibili ostacoli all'adozione della tecnologia derivati dal quadro legislativo e dai contratti che regolano le operazioni delle società di servizi; e il rischio tecnologico, che si presenta nei progetti basati su tecnologie che non sono state pienamente consolidate in passato. Parallelamente, l'analisi dei fattori industriali considera come la tecnologia di interesse possa contribuire a rispondere alla domanda dei clienti e l'intensità della concorrenza, riferita alla struttura dell'offerta del mercato. Il risultato di questa analisi fornisce una valutazione complessiva del livello di attrattività della tecnologia (Figura 5).

Quanto emerso dalla nostra analisi suggerisce che il PMD è il servizio con il più alto livello di attrattività e con il più basso livello di rischi e barriere all'ingres-

FIGURA 4 | SCENARIO DI RIFERIMENTO E SCENARI DI MISURE DI MITIGAZIONE

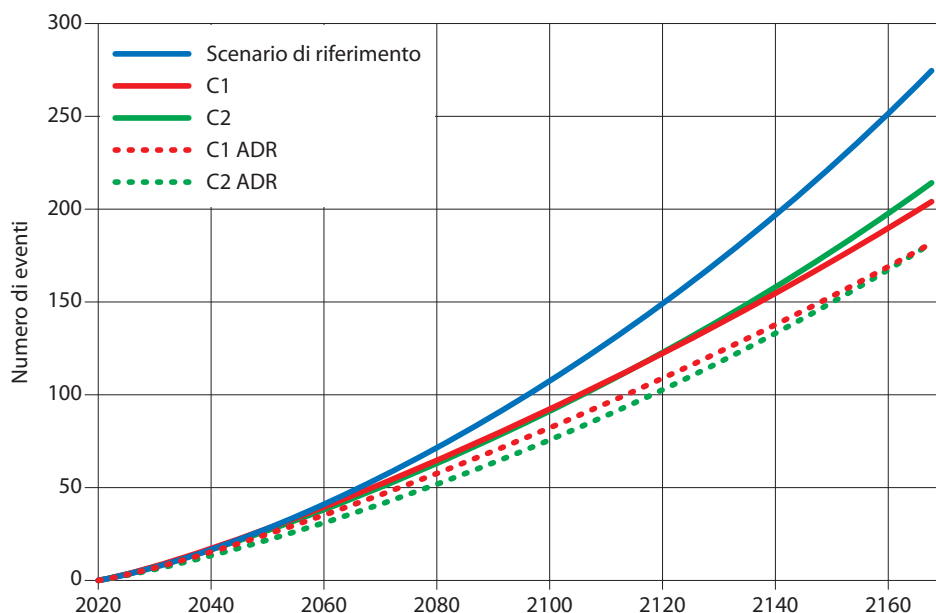
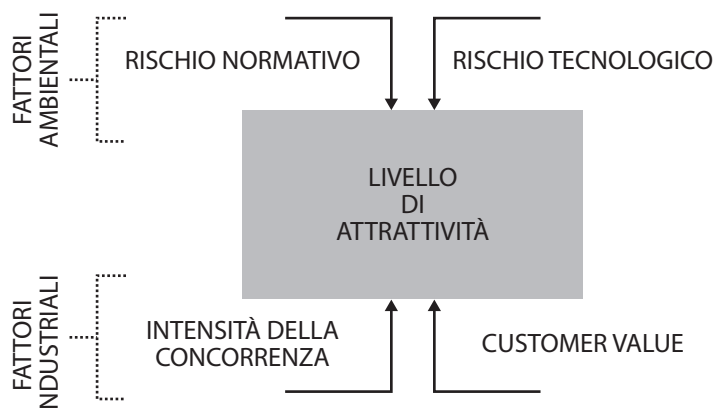


FIGURA 5 | IL MODELLO DEL LIVELLO DI ATTRATTIVITÀ



so in termini di fattibilità e maturità tecnologica e potenziale mercato di riferimento. Per quanto riguarda l'ADR, invece, il modello evidenzia rischi elevati, in particolare in relazione all'attuale contesto normativo, che pone limiti allo sviluppo del mercato. Infatti, al fine di prevenire incidenti diplomatici in corrispondenza dell'adozione dell'ADR, sono ancora necessari chiarimenti in merito:

- all'identificazione della proporzione di detriti di cui ogni Stato è responsabile;
- allo sviluppo di protocolli/accordi tra lo Stato di lancio e le entità terze dedicate alle attività di rimozione;
- alla definizione delle responsabilità se una terza parte è danneggiata durante il processo di rimozione; alle questioni di sicurezza relative ai satelliti militari.

Per ragioni politiche, alcuni Stati come gli Stati Uniti, la Russia e la Cina sono riluttanti a permettere ad altri governi di interferire con i loro satelliti. Per queste ragioni, la natura *dual-use* delle tecnologie ADR contiene implicazioni strategiche, militari e politiche.

UNA QUESTIONE DI DECISIONI

Considerato il ruolo chiave indicato dagli scenari per PMD e ADR, vale la pena di chiedersi se gli operatori privati abbiano un incentivo economico sufficiente per adottare tali misure di mitigazione dei detriti. La nostra analisi decisionale, riassunta nella Figura 6, ha valutato se la riduzione del rischio di collisione consentita da PMD e ADR, e la conseguente diminuzione delle perdite economiche legate alla collisione, possa spingere gli operatori satellitari a svolgere tali pratiche.

L'analisi ha preso in considerazione tre fattori principali in grado di influenzare la decisione degli operatori satellitari di adottare (o meno) misure di mitigazione:

- la probabilità di collisione, supponendo che una maggiore probabilità di collisione possa essere un incentivo per implementare pratiche di mitigazione;
- i costi derivati dalle collisioni, vale a dire il costo di sostituzione dei satelliti colpiti, nel caso in cui non possano essere riparati, o il costo dei servizi di riparazione, nel caso in cui i danni legati alla collisione possano essere risolti, così come i costi derivati dall'interruzione delle funzionalità dei satelliti colpiti;
- i costi di adozione delle misure di mitigazione, che, per quanto riguarda il PMD, sarebbero rappresentati principalmente dai costi del carburante per le manovre di spostamento, mentre, nel caso dell'ADR, corrisponderebbero o al costo dello sviluppo della tecnologia ADR (qualora un'azienda decida di svilupparla internamente) o a quello di un servizio ADR fornito da terzi (qualora un'azienda scelga di acquistarlo sul mercato).

Il nostro modello si è concentrato su questi tre elementi in quanto elementi basilari nella scelta di adottare o meno misure di mitigazione.

Tuttavia, un altro aspetto deve essere preso in considerazione. Come nel caso, per esempio, delle emissioni di gas serra, quando un gran numero di attori esercita una pressione negativa su una risorsa comune, le iniziative individuali di mitigazione non corrispondono necessariamente a una diminuzione puntuale del rischio ambientale complessivo. Basti considerare un'azienda che sceglie di limitare le proprie emissioni di anidri-

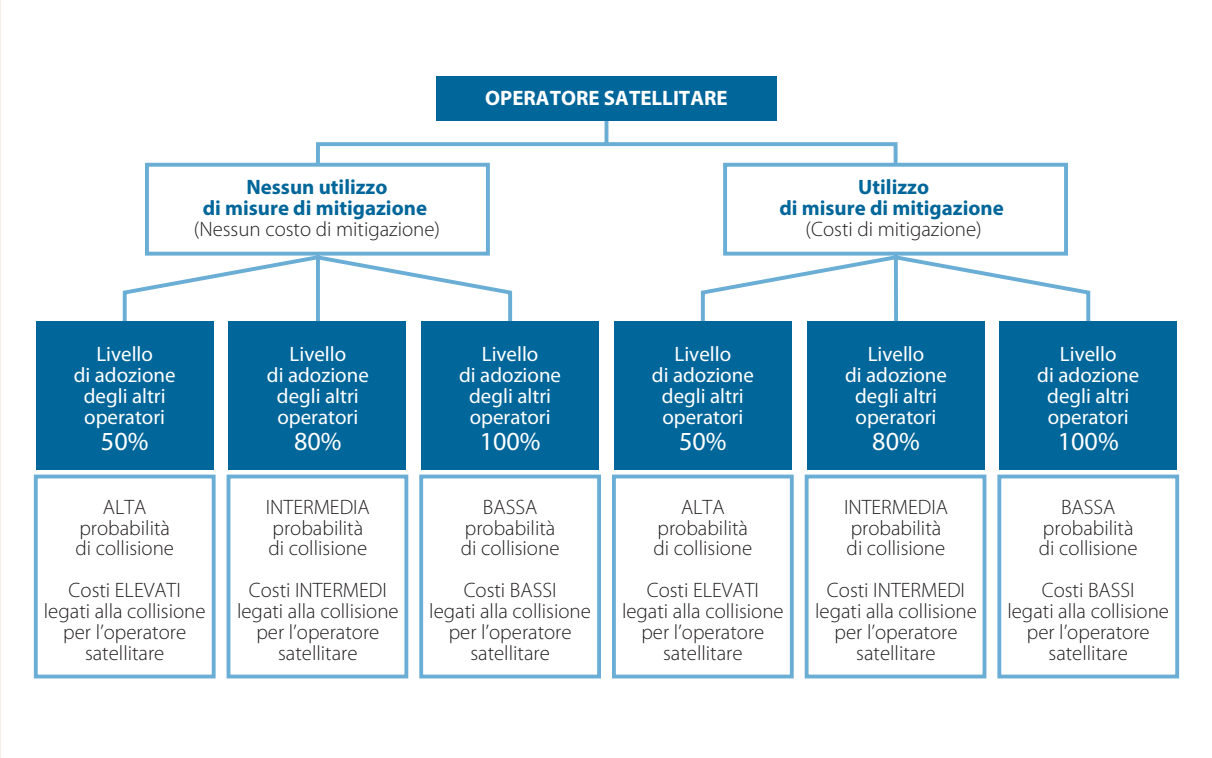
de carbonica: anche se tale scelta riduce l'ammontare complessivo di emissioni, la qualità dell'aria sarebbe ancora influenzata dalle emissioni generate dalle altre aziende. Lo stesso vale nel caso dei detriti spaziali. Questo significa che le decisioni di altri operatori possono influenzare la scelta individuale di ciascuno di essi. Per questo motivo, la nostra analisi decisionale ha esaminato le opportunità di un singolo operatore (cioè, sostenere o meno i costi relativi a PDM e/o ADR) in relazione a tre scenari:

- bassa adozione complessiva di misure di mitigazione (cioè, solo il 50 per cento degli oggetti vengono rimossi dall'orbita), corrispondente a un'alta probabilità di collisione e ad alti costi legati alla collisione;
- media adozione complessiva della misura di mitigazione (cioè, l'80 per cento degli oggetti vengono rimossi dall'orbita), corrispondente a una probabilità intermedia di collisione e costi intermedi legati alla collisione;
- piena adozione complessiva della misura di mitigazione (cioè, il 100 per cento degli oggetti vengono rimossi dall'orbita), corrispondente a una bassa probabilità di collisione e bassi costi legati alla collisione.

Assumendo la prospettiva di un operatore privato, l'adozione di PMD e/o ADR risulta conveniente ogni volta che il costo del loro dispiegamento è inferiore alle perdite potenziali derivanti da eventuali collisioni.

Tuttavia, questa dinamica fondamentale basata sul confronto tra il costo delle misure di mitigazione e il costo delle collisioni, dipende dall'effettiva esposizione dei satelliti ai danni, cioè il rischio di collisione e ciò che lo influenza. Come anticipato sopra, il comportamento degli altri attori assume qui una rilevanza cruciale in quanto il tasso complessivo di adozione delle misure di mitigazione determina il numero di oggetti spaziali lasciati in orbita come detriti che possono causare un incidente. Di conseguenza, se un operatore satellitare decidesse di attuare misure di mitigazione in corrispondenza di un basso tasso complessivo di adozione, la sua iniziativa potrebbe avere un impatto molto limitato sul rischio di collisione. Tale dinamica potrebbe, dunque, scoraggiare le iniziative unilaterali. Al contrario, iniziative collettive coordinate sarebbero più efficaci e stimolerebbero i singoli attori a procedere. In quest'ultimo caso, dovrebbero essere fornite garanzie contro il *free-riding*. Infatti, un alto tasso di adozione di misure di mitigazione potrebbe spingere qualche operatore a beneficiare della mobilitazione della maggioranza, pur continuando la propria cattiva condotta. Anche se la presenza di un incentivo economico all'adozione di misure di mitigazione porterebbe gran parte degli operatori a fare la stessa scelta senza coordinarsi, è probabile che un'ampia adozione sarebbe raggiunta gradualmente, lasciando spazio al *free-riding*.

FIGURA 6 | MODELLO DI ANALISI DECISIONALE



Il modello, quindi, evidenzia che la scelta dei singoli operatori di adottare o meno misure di mitigazione è influenzata dai costi delle pratiche di mitigazione e dalla probabilità delle collisioni (determinata dalle scelte della maggioranza degli operatori), così come dai costi derivati da queste ultime. Come potrebbe intervenire l'istituzione pubblica per sostenere questo fragile quadro di libero mercato?

Come prima cosa, l'intervento degli attori pubblici potrebbe abbassare i costi di adozione delle pratiche di mitigazione attraverso misure di co-finanziamento (per esempio, attraverso un modello di partenariato pubblico-privato). Le stime attuali sui costi dell'ADR, infatti, rendono difficile credere che i privati possano sviluppare e adottare le tecnologie ADR senza alcun supporto esterno. In questo caso, gli enti pubblici possono sia contribuire alla creazione di un mercato per lo smaltimento dei detriti spaziali, in cui nuove aziende possano fornire un servizio ADR agli operatori spaziali privati e pubblici, sia fornire un sostegno finanziario diretto allo sviluppo della tecnologia ADR. In secondo luogo, poiché un'ampia adozione di misure di mitigazione è cruciale per ridurre efficacemente la quantità di detriti spaziali, una regolamentazione vincolante prevista dalle istituzioni pubbliche potrebbero aumentare

il tasso complessivo di diffusione delle pratiche di mitigazione e prevenire il rischio di *free-riding*.

IL NET ZERO SPACE

Coerentemente con la discussione sulle soluzioni private e pubbliche ai problemi di gestione delle risorse comuni, la nostra analisi ha mostrato che le misure di mitigazione più efficaci includono pratiche diverse e che il loro dispiegamento richiede la collaborazione di parti private e istituzioni pubbliche. Come nel caso delle iniziative di mitigazione del cambiamento climatico, gli attori che operano nel settore satellitare stanno cominciando a mobilitarsi. Durante l'ultimo Paris Peace Forum, tenutosi nel novembre 2021, dieci aziende e organizzazioni del settore spaziale hanno dato vita al Net Zero Space, un'iniziativa multi-stakeholder che include diversi attori, dagli operatori satellitari ai lanciatori, dalle agenzie spaziali alle università e alla società civile, tutti impegnati a sviluppare e implementare misure concrete per ridurre la quantità di detriti spaziali entro il 2030. Come sostenuto da alcuni dei firmatari, le partnership con i governi e le istituzioni pubbliche saranno la chiave per raggiungere una sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali.

¹ «Space Sustainability the Economics of Space Debris in Perspective OECD Science», *Technology and Industry Policy Papers*, OECD, 2020.

² G. Hardin, «The Tragedy of the Commons: The Population Problem Has no Technical Solution; it Requires a Fundamental Extension in Morality», *Science*, 162(3859), 1968, 1243-1248.

³ A.E. Kahn, «The Tyranny of Small Decisions: Market Failures, Imperfections, and the Limits of Economics», *Kyklos*, 19, 1966, pp. 23-47 («A situation in which a series of small, individually rational decisions, cumulatively results in a larger and significant outcome which is neither optimal nor desired and can negatively change the context of subsequent choices, even to the point where desired alternatives are irreversibly destroyed»).

⁴ E. William Odum, «Environmental Degradation and the Tyranny of Small Decisions», *BioScience*, 32(9), 1982, pp. 728-729.

⁵ A. Rossi, L. Anselmo, C. Pardini, R. Jehn, G.B. Valsecchi, *The New Space Debris Mitigation (SDM 4.0) Long Term Evolution Code*, Proceedings of the Fifth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germania, Paper ESA SP-672, 2009.

IN SINTESI

- L'aumento del numero di oggetti spaziali nell'orbita bassa terrestre rappresenta una minaccia per la sostenibilità a lungo termine dell'ambiente spaziale, incrementando il rischio di collisione tra satelliti attivi e detriti spaziali. La mancanza di un quadro normativo vincolante permette agli operatori satellitari di non prendersi responsabilità in merito alla preservazione dell'orbita, perseguendo in questo modo interessi legati al loro business.
- Il modello sviluppato dal SEE Lab di SDA Bocconi, in collaborazione con il CNR italiano, evidenzia come il ruolo delle istituzioni pubbliche potrebbe incoraggiare la diffusione delle iniziative di mitigazione del rischio di collisione di oggetti spaziali tramite misure di co-finanziamento e/o di una regolamentazione vincolante.
- Come nel caso delle iniziative di mitigazione del cambiamento climatico, attori pubblici e privati stanno cominciando a mobilitarsi per ridurre il numero di detriti presenti nell'orbita terrestre. Gli operatori privati impegnati in tale direzione considerano le partnership con le istituzioni pubbliche fondamentali per raggiungere una sostenibilità a lungo termine delle attività spaziali.