

Inquinamento da satelliti artificiali e space debris

Albino Carbognani, INAF-OAS
Versione del 26 aprile 2021

I satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra hanno attratto l'attenzione degli astronomi sin dal lancio dello **Sputnik 1**, avvenuto il 4 ottobre 1957. In effetti l'osservazione dei corpi celesti da un satellite permette di utilizzare bande dello spettro elettromagnetico che non arrivano al suolo perché assorbite dall'atmosfera, ma solo una piccolissima parte dei satelliti in uso è destinato a osservazioni scientifiche, la maggior parte ha utilizzi militari e commerciali.

Attualmente in orbita geocentrica ci sono **4070 satelliti operativi** e **2900 non più funzionanti**. A questi quasi 7.000 oggetti devono essere aggiunti gli **space debris** ossia i **detriti spaziali**, formati da stadi di razzi usati per l'immissione in orbita dei satelliti e frammenti che derivano dalle esplosioni dei motori o dalle collisioni già avvenute in orbita. Si stima che, a partire dal lancio dello Sputnik 1 a oggi gli **eventi di frammentazione in orbita siano stati circa 560**. Il numero di space debris con orbite geocentriche note sono circa 28.000, ma questo non è il numero dell'intera popolazione. Infatti i frammenti più piccoli sfuggono alla detection di radar e telescopi al suolo ed è necessario ricorrere a metodi statistici per avere una stima della popolazione totale di oggetti: un po' come si fa per stimare il numero totale della popolazione di asteroidi near-Earth: da quelli osservabili si deduce la legge di potenza che li governa e si estrapola alle dimensioni che non sono visibili.

Dalle stime risulta che gli space debris con dimensioni maggiori di 10 cm sono 34.000, mentre quelli con dimensioni nel range 1 – 10 cm salgono a 900.000 e a 128 milioni quelli nel range 0,1 – 1 cm¹. Come si vede lo spazio circumterrestre è davvero molto affollato, troppo: gli space debris **sono un serio problema per la vita operativa dei satelliti** e la **navigazione spaziale**. In pratica lo spazio circumterrestre è popolato da una vera e propria “nube” di oggetti artificiali, il cui numero aumenta sempre più, sia per i nuovi lanci, sia per effetto delle reciproche collisioni, che – anche se avvengono di rado – aumentano in modo esponenziale il numero dei frammenti più piccoli in orbita.

Tipi di orbite

Tutte le orbite dei satelliti artificiali sono di tipo **geocentrico**, ossia hanno come centro di forza il centro di massa della Terra. Sono considerate orbite basse (o **LEO, Low Earth Orbit**), quelle superiori ai **160 km** e inferiori ai **2000 km**, dove si fa ancora sentire l'attrito della pur tenue atmosfera terrestre. Ad esempio, la ISS e il telescopio Spaziale “Hubble” sono satelliti in LEO. I periodi orbitali tipici dei satelliti in LEO vanno da 88 a 120 minuti. I satelliti a circa **36.000 km** di quota si trovano in orbita **geosincrona** (o **GEO, Geosynchronous Earth Orbit**) ossia il periodo orbitale è identico al periodo di rotazione della Terra: 23h 56m 04s di tempo solare medio.

¹ <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>

Se l'**inclinazione dell'orbita sul piano dell'equatore terrestre è nulla**, allora questi satelliti restano fissi in cielo rispetto all'osservatore (ma non alla sfera celeste) e sono chiamati **geostazionari**. I tipici satelliti geostazionari sono quelli per le telecomunicazioni. I satelliti con orbita compresa fra i LEO e i GEO sono i **MEO** (Medium Earth Orbit), con periodi orbitali compresi fra 2 e 24 ore. Se la MEO è sufficientemente ellittica il satellite sarà costretto a passare all'interno delle **fasce di Van Allen**, e questo può costituire un problema per l'elettronica di bordo. Le fasce di Van Allen sono dei **toroidi di particelle cariche** (elettroni e protoni), intrappolate dal **campo magnetico terrestre** per effetto della **forza di Lorentz**. La fascia di Van Allen interna si estende fra 1000 e 6000 km di quota, quella esterna fra 14.000 e 19.000 km. Per la presenza di queste due fasce **la zona delle orbite MEO è scarsamente popolata**. I tipici satelliti MEO sono usati per la navigazione, le comunicazioni e la geodetica. La quota più comune per i MEO è appena al di sopra della fascia esterna di Van Allen, a circa 20.200 km, cui corrisponde un periodo orbitale di 12 ore. Quest'orbita viene usata, per esempio, dai satelliti del sistema **GPS (Global Positioning System)** degli Stati Uniti o gli analoghi **Galileo** europei. Per la bassa energia richiesta al lancio e la possibilità di osservare nei più fini dettagli la superficie della Terra, il tipo di orbita più usata è la LEO: questa è la regione di spazio più affollata da satelliti scientifici, militari, per la meteorologia e la navigazione.

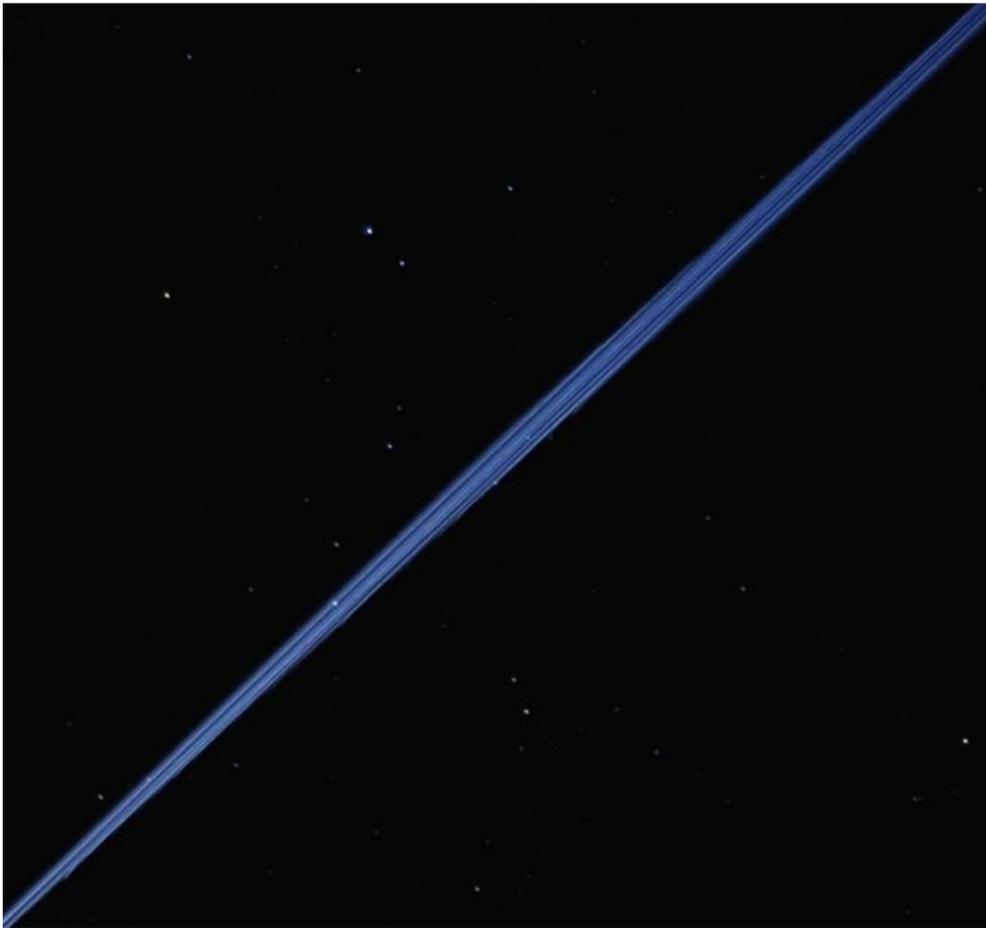


Figura 1 – Immagine delle tracce lasciate nel cielo di Loiano (BO), da un flotta di 60 satelliti Starlink lanciati il 22 aprile 2020. La foto è stata fatta il 23 aprile 2020 quando i satelliti erano ancora molto vicini fra loro, prima di essere immessi sull'orbita definitiva (Crediti: A. Carbognani/INAF).

Gli starlink

Sulle immagini astronomiche ottenute con i telescopi a terra i satelliti artificiali, se illuminati dal Sole, appaiono come delle strisce luminose di varie lunghezze: una manna per chi studia le orbite dei satelliti, un disturbo per chi osserva corpi celesti d'interesse astrofisico. Se una traccia satellitare passa sopra la sorgente d'interesse l'informazione va persa.

Nel prossimo decennio il numero dei satelliti operativi in orbita attorno alla Terra è destinato ad aumentare di un fattore 10 per via del lancio delle grandi costellazioni di satelliti per le comunicazioni come gli Starlink. Chiaramente questo aumenterà la probabilità di trovare tracce di satelliti nelle immagini astronomiche, in particolare per i telescopi a grande campo di nuova generazione.

Il progetto della **costellazione di satelliti Starlink** è stato sviluppato nel 2015 della società statunitense SpaceX, molto nota al grande pubblico per lo sviluppo della **Starship**, il veicolo riutilizzabile destinato a portare l'uomo su Marte. Lo scopo principale del progetto Starlink è creare una rete satellitare ad alte prestazioni per consentire l'accesso a Internet in banda larga da ogni angolo del pianeta. I primi 60 satelliti della costellazione sono stati lanciati usando un razzo **Falcon 9 da Cape Canaveral** già a fine maggio 2019 e, periodicamente, avvengono nuovi lanci di alcune decine di satelliti contemporaneamente. A gennaio 2021 i satelliti operativi erano 1081 e arriveranno a 1500 a fine anno. Il completamento della costellazione è previsto entro il 2027 e sarà formata da **11.927 satelliti**.

La distribuzione delle orbite non è la stessa per tutti i satelliti. In prima approssimazione ci saranno **tre gruppi di satelliti** anche se tutti in LEO, ossia con quote orbitali al di sotto dei 2000 km. Il primo gruppo di 7518 satelliti orbiterà a circa **340 km** di altezza sulla superficie terrestre (inclinazione dell'orbita sull'equatore terrestre di 53°), il secondo costituito da 1584 elementi si troverà a circa **550 km** (inclinazione media dell'orbita di 48°), infine il terzo di 2825 satelliti orbiterà attorno a **1200 km** di quota (inclinazione media dell'orbita di 70°). In questo modo, praticamente ogni punto della superficie terrestre sarà visto da almeno un satellite. Considerato il numero di elementi, la costellazione degli Starlink darà quindi un contributo non trascurabile all'attuale popolazione satellitare.

Interferenze in campo radio e ottico

Gli Starlink comunicheranno con il suolo usando onde radio con frequenze tra 10,7 e 12,7 GHz un intervallo dove c'è una delle bande previste per lo **Square Kilometre Array (SKA)**. SKA sarà un **radiotelescopio** composto da migliaia di piccole antenne collocate in Australia e Sudafrica in grado di rilevare onde radio con una sensibilità e risoluzione mai raggiunte prima. Gli obiettivi scientifici principali sono la verifica della teoria della Relatività Generale in condizioni estreme, l'osservazione di galassie remote per studi di cosmologia su materia ed energia oscura e la ricerca di vita extraterrestre. Le interferenze con le comunicazioni degli Starlink sarebbero deleteri per questo tipo di osservazioni. Naturalmente gli Starlink sarebbero solo gli ultimi arrivati nella lista delle interferenze in campo radio: già i radar militari e i satelliti per le comunicazioni danno il loro contributo, ad esempio, fra 1 e 2 GHz, frequenze usate in radioastronomia per lo studio delle pulsar. I problemi con gli Starlink non terminano nel campo radio, ma si estendono anche ai telescopi ottici al suolo.

Osservabilità degli Starlink dal suolo

In generale, un satellite artificiale è visibile da terra quando sulla superficie terrestre il Sole è tramontato, ma il satellite riceve ancora luce perché si trova a un'altezza superiore. Quindi **un satellite artificiale è tanto più a lungo visibile quanto più è elevata l'altezza della sua orbita**. Il satellite diventa invisibile dall'emisfero notturno solo quando entra nel **cono d'ombra della Terra**.

Per fissare le idee supponiamo di essere all'equatore, con il satellite in orbita equatoriale e nel periodo dell'equinozio.

Gli Starlink che si trovano a una quota attorno ai 340 km di quota saranno **osservabili fino a 2h 24 m dopo il tramonto del Sole**. Considerato che la **notte astronomica inizia circa 1 h 42 m** dopo il tramonto del Sole si hanno 42 minuti di tempo osservativo con possibili satelliti nel campo di vista del telescopio. Ovviamente ci sono altri 42 minuti persi verso l'alba. Questo vuol dire che su una notte astronomica media di circa 9 h (il periodo notturno utile all'osservazione), andrà perso circa **il 15% del tempo osservativo** se si vuole evitare che la scia luminosa lasciata dal passaggio di qualche satellite rovini le immagini astronomiche. Visto che questi satelliti saranno osservabili fra $\pm 53^\circ$ di latitudine, in cielo occuperanno circa **32.946 gradi quadrati** dei 41.253 gradi quadrati che misura tutta la sfera celeste. Di conseguenza, supponendo che siano uniformemente distribuiti, in media ne **saranno osservabili circa 442 dopo l'inizio della notte astronomica e prima della sua fine**.

Gli Starlink a circa 550 km di quota saranno osservabili più a lungo rispetto ai primi perché sono a quota maggiore. Arriveranno a **circa 3 ore** dopo il tramonto del Sole e saranno visibili circa 3 ore prima del suo sorgere. Su una notte astronomica di circa 9 ore vuol dire avere potenziali difficoltà osservative per il **29% del tempo utile**. Globalmente e con le stesse ipotesi di prima, saranno visibili in media **172 satelliti**.

Infine, gli Starlink a circa 1200 km di quota saranno osservabili fino a **4h 14m** dopo il tramonto del Sole e lo stesso tempo prima dell'alba. Qua la perdita potenziale di tempo osservativo arriva a 5 h, ossia circa il **56% su una notte astronomica di 9 h**. Saranno visibili in media **589 satelliti**. **L'effetto complessivo della costellazione Starlink sarà cumulativo** quindi, in media, il numero totale di satelliti osservabili nella notte astronomica (all'inizio e alla fine) sarà di circa **1200 satelliti**. Entro i $\pm 50^\circ$ di latitudine si potranno osservare in media **0,35 satelliti/grado quadrato** ossia un satellite ogni circa **3 gradi quadrati, tendenzialmente verso ovest alla sera e verso est al mattino**.

Questi numeri potrebbero non essere un problema se il campo di vista del telescopio è piccolo, ma consideriamo un telescopio innovativo come il FlyEye dell'ESA²: l'obiettivo ha un metro di diametro ed è progettato appositamente per la scoperta di nuovi **near-Earth**, ossia gli asteroidi potenzialmente a **rischio impatto con la Terra**. Questo telescopio ha un campo di vista di ben **45 gradi quadrati**, quindi potrà riprendere contemporaneamente circa **16 satelliti, anche quelli completamente invisibili a occhio nudo**. Le scie luminose lasciate da questi oggetti rovineranno l'immagine a grande campo rendendo molto più complicata la detection di eventuali NEA, specie quelli più difficili da scoprire perché a **bassa elongazione dal Sole**, ossia osservabili a ovest alla sera e a est al mattino.

L'inquinamento luminoso della nube di satelliti

C'è un altro fattore che dev'essere tenuto sotto controllo per poter continuare a fare ricerca in campo astronomico: **l'inquinamento luminoso**. La causa principale di questa forma di inquinamento ambientale va ricercata principalmente nelle **sorgenti luminose** impiegate per **l'illuminazione notturna di strade ed edifici** che diffondono una buona parte della loro radiazione

² https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Safety/ESA_Flyeye_telescopes

verso l'alto, cancellando il cielo notturno. La dispersione verso l'alto della radiazione luminosa, **ovvero dove non serve**, porta non solo a uno spreco energetico, ma anche all'alterazione degli ecosistemi notturni. In effetti è esperienza comune a tutti che, dalle città, **il cielo notturno non è più visibile**, se non per gli astri più brillanti come Luna e Venere: bisogna almeno portarsi in aperta campagna per iniziare a distinguere le principali costellazioni o percepire la debole fascia della Via Lattea. Quello che era patrimonio di tutti è diventato accessibile a pochi. In un sito affetto da inquinamento luminoso le prestazioni di un telescopio si riducono per via della radiazione di fondo, per questo motivo gli osservatori astronomici vengono costruiti in posti remoti il più lontano possibile dalla civiltà: basta pensare all'**ESO**, l'Osservatorio australe europeo che si trova in quel luogo, desolato e buio, che è il **deserto di Atacama in Cile**.

Le scie lasciate da satelliti e space debris sulle immagini CCD degli astronomi e l'inquinamento luminoso possono sembrare sorgenti di disturbo separate, ma in realtà un punto in comune c'è. Basta considerare che si tratta di corpi in orbita geocentrica che diffondono una buona frazione della luce del Sole che ricevono: che **contributo** possono dare **satelliti artificiali** e **space debris** all'**inquinamento luminoso**? Si tratta di una domanda che si sono fatti in pochi e - a prima vista - la risposta sembrerebbe essere che sia del tutto trascurabile. Ha provato recentemente a rispondere alla domanda un team guidato dall'astronomo slovacco Miroslav Kocifaj e la risposta si trova in un paper pubblicato sul Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters.³

Un satellite o uno space debris diffondono una parte della radiazione solare che intercettano verso terra e questa, **attraversando l'atmosfera**, viene **diffusa** da molecole e pulviscolo andando ad aumentare la luminosità di fondo cielo. Mentre i telescopi e le fotocamere spesso risolvono gli oggetti spaziali come punti di luce discreti, i rivelatori di luce a bassa risoluzione come l'occhio umano vedono solo l'effetto combinato di molti di questi oggetti. L'analisi teorica di Kocifaj e colleghi include le distribuzioni note delle dimensioni e della luminosità sia di satelliti funzionanti, sia di space debris. Non sono state incluse le mega-costellazioni future o gli oggetti non noti. Alla fine dei calcoli l'effetto che si trova è un aumento complessivo **non trascurabile** della luminosità diffusa del cielo notturno. I risultati pubblicati indicano che la luminosità di fondo cielo è **proporzionale al numero di satelliti lanciati** e alle loro caratteristiche ottiche una volta in orbita.

³ <https://academic.oup.com/mnras/advance-article/doi/10.1093/mnras/slab030/6188393>



Figura 2 - Gli effetti deleteri dell'inquinamento luminoso sul cielo notturno sono ben visibili in questa immagine dell'Appennino emiliano. La visione della volta celeste è quasi del tutto cancellata a causa delle luci artificiali che non sono schermate verso l'alto e diffondono ovunque la radiazione (Crediti: A. Carbognani).

Questa nuova componente alla luminosità di fondo cielo corrisponde al **10% di quella naturale allo zenit**, superando i limiti scelti dall'Unione Astronomica Internazionale nel 1979 per la luce diffusa che può essere presente nei siti sedi di osservatori astronomici. Il livello naturale di luminosità di fondo cielo è difficile da stabilire, dal momento che qualsiasi banda di osservazione si consideri, compresa quella visuale, è ampiamente variabile a seconda della regione del cielo che si considera, la posizione dell'osservatore, lo stato dell'atmosfera e l'intensità fluttuante **dell'airglow**.

Tenuto conto di questi limiti, la luminosità naturale del cielo nel visibile corrisponde a una brillantezza di circa **+22 mag/secondo d'arco quadrato**. Il contributo della luce diffusa da satelliti e space debris alza questa brillantezza a circa **+21.9 mag/secondo d'arco quadrato**. Va osservato che, a differenza dell'inquinamento luminoso prodotto al suolo, questo tipo di inquinamento luminoso del cielo notturno può essere visto da gran parte della superficie terrestre: costruire un osservatorio in luoghi remoti non risolve il problema e l'entrata in servizio delle mega-costellazioni aumenterà di almeno il 50% la diffusione della luce in atmosfera.

Conclusioni

Abbiamo visto come le nuove costellazioni di satelliti possano aumentare in modo considerevole il numero di oggetti in orbita geocentrica, creando un disturbo sia nel campo radio sia in quello ottico. Per quanto riguarda i telescopi saranno quelli innovativi a grande campo a essere penalizzati maggiormente. Inoltre, già ora l'inquinamento luminoso veicolato da satelliti e space debris è tale che supera del 10% il fondo cielo naturale e la situazione non potrà che peggiorare rapidamente nei prossimi anni all'aumentare del numero di oggetti in orbita.

La IAU (International Astronomical Union) è preoccupata di come potrà evolvere la situazione. In un [recente comunicato stampa](#) della Commissione B7 (**Commission Protection of Existing and Potential Observatory Sites**) si scrive:

“Satellite constellations can pose a significant or debilitating threat to important existing and future astronomical infrastructures, and we urge their designers and deployers as well as policy-makers to work with the astronomical community in a concerted effort to analyse and understand the impact of satellite constellations. We also urge appropriate agencies to devise a regulatory framework to mitigate or eliminate the detrimental impacts on scientific exploration as soon as practical.”

Un coordinamento preventivo fra le agenzie spaziali commerciali e l’IAU appare necessario, prima che la situazione sfugga di mano e diventi – di fatto – irreversibile, assestando un duro colpo alla ricerca scientifica in campo astronomico.