

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

---

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA "TULLIO LEVI-CIVITA"

Corso di Laurea Triennale in Matematica

## Studio dell'impatto delle costellazioni di satelliti sulle osservazioni astronomiche da Terra

Relatore:

Prof. Paolo Cassata

Laureando:

Michele Casarotto

Matricola 1220518

---

Anno Accademico 2022-2023

22 settembre 2023



*“Un cielo notturno incontaminato che permette il godimento e la contemplazione del firmamento dovrebbe essere considerato un diritto inalienabile dell’umanità [...] a causa del suo impatto sullo sviluppo di tutti i popoli e sulla conservazione della biodiversità”*

La Palma Declaration – 2007



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>1 Astronomia Ottica</b>	<b>7</b>
1.1 Sistemi di Riferimento (SdR) . . . . .	7
1.1.1 Sistema Alt-azimutale . . . . .	8
1.1.2 Sistema Equatoriale . . . . .	9
1.2 I telescopi . . . . .	10
1.2.1 Le Aberrazioni, Ottica Attiva e Ottica Adattiva . . . . .	12
1.3 Osservatorio Vera C. Rubin . . . . .	14
1.3.1 Energia e Materia Oscura . . . . .	16
1.3.2 Il Sistema Solare . . . . .	16
1.3.3 La Via Lattea . . . . .	17
1.3.4 Eventi astronomici transienti . . . . .	18
1.3.5 Problematiche . . . . .	18
<b>2 Satelliti</b>	<b>21</b>
2.1 Descrizione . . . . .	21
2.1.1 Orbite . . . . .	22
2.1.2 Composizione . . . . .	24
2.2 SpaceX . . . . .	24
2.2.1 Starlink - Storia e numeri . . . . .	25
2.2.2 Starlink - Visibilità . . . . .	27
2.2.3 Starlink - Impatti e soluzioni . . . . .	29
2.2.4 Ricerca di Asteroidi . . . . .	31
2.2.5 Non solo Astronomia - Ambiente . . . . .	32
2.2.6 Non solo Astronomia - Legislazione . . . . .	33
2.3 Punti di vista differenti fra astronomi . . . . .	34

INDICE	4
<b>3 Numeri alla mano</b>	<b>37</b>
3.1 Quantità progettate . . . . .	37
3.2 Quantità attuali (08/2023) . . . . .	40
3.3 Impatti e visibilità attuale . . . . .	41
3.4 Conclusioni . . . . .	46
<b>Bibliografia</b>	<b>49</b>

# Introduzione

Nel maggio del 2019 è avvenuto con successo il lancio dei primi 60 satelliti del progetto *Starlink* del produttore privato aerospaziale americano *SpaceX*, il quale ha l'obiettivo di offrire un servizio Internet ad alta velocità rispondendo all'aumento della richiesta di mercato. Da allora il numero di lanci è continuato con cadenza mensile, attirando a sé una grande attenzione mediatica da parte di tutta la comunità scientifica, in particolare alle ripercussioni che la grande quantità di satelliti in orbita porterà sulle osservazioni astronomiche. *Starlink* non è né il primo, né l'unico progetto che si propone di diffondere la navigazione in Rete attraverso una costellazione di satelliti; il numero di aziende che hanno dichiarato l'intenzione di mettere in campo progetti simili è grande (come ad esempio Amazon, con il *Progetto Kuiper*). In questo studio verranno trattati gli attuali effetti dati dai satelliti di *Elon Musk*. Questa tesi si sviluppa in 3 parti legate fra loro:

- il Capitolo 1 servirà come introduzione all'*Astronomia da Terra*[1], per rendere più comprensibile la lettura anche ai meno esperti. Andrò ad analizzare uno specifico osservatorio (in costruzione), il *Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time (LSST)*[2], nel nord del Cile, il quale ha l'obiettivo di studiare l'intera volta celeste notturna dell'emisfero australe;
- nel Capitolo 2 verrà esposta la problematica di fondo di questo studio, ovvero l'aumento dei satelliti nella bassa (e non solo) atmosfera, con grande preoccupazione degli astronomi ottici. Il tema è molto divisivo, potrete prendere visione sia dei vantaggi che degli svantaggi portati da questi progetti;
- nel Capitolo 3 si quantificherà il problema, con calcoli semplici ed approfonditi, basandoci sugli attuali dati.





# Capitolo 1

## Astronomia Ottica

### 1.1 Sistemi di Riferimento (SdR)

Per poter capire ciò che stiamo osservando, la cosa migliore da fare è sapere dove siamo, ovvero la nostra posizione sulla Terra, infatti quello che possiamo vedere momento dopo momento dipenderà da essa. In geodesia le coordinate geografiche servono ad individuare un punto sulla superficie terrestre. Per semplicità, ci riduciamo a considerare la Terra come una sfera, con il suo asse di rotazione, l'Equatore, i paralleli e i meridiani.

**Definizione 1.1. (sistema di coordinate geografiche):**

La posizione di un punto P sulla superficie della Terra è data da 3 componenti:

- la **latitudine** è la distanza angolare di P dall'Equatore, misurata in gradi;
- la **longitudine** è la distanza angolare di P dal meridiano di Greenwich lungo lo stesso parallelo, misurata in gradi.
- l'**altitudine** è la distanza dal livello del mare, calcolata sulla verticale da P (tuttavia per gli studi in astronomia ci limiteremo solo alle prime 2)

Allo stesso modo, parlando di *sfera celeste* possiamo ricondurci agli stessi concetti, cambiando opportunamente nomi e origini, in quanto stiamo pur sempre parlando di sfere.

**Definizione 1.2.** La **sfera celeste** è una sfera apparente, di raggio indefinito, con centro l'osservatore (umano o meno) e serve a stabilire la posizione e la direzione degli astri indipendentemente dalla loro reale distanza.

**Definizione 1.3.** A seconda dell'osservatore, si possono definire diversi tipi di sfere:

- **sfera celeste locale** (s.c.l.) è la sfera fittizia intorno a un osservatore sulla superficie terrestre, delimitata dall'orizzonte del luogo e individuata dalla posizione occupata sul suolo terrestre;
- **sfera celeste geocentrica** (s.c.g.) è la sfera fittizia intorno al pianeta Terra, quindi uguale per tutti gli osservatori sul pianeta.

In base al tipo di sfera scelto, avremo sistemi di coordinate distinti:

(A) Sistema Alt-azimutale

(B) Sistema Equatoriale

### 1.1.1 Sistema Alt-azimutale

Il *Sistema Alt-azimutale* usa due grandezze chiamate **altezza** e **azimut** per localizzare oggetti nel cielo in maniera intuitiva; per trovare tali misurazioni occorre partire da alcuni punti costruiti sulla s.c.l., relativi all'osservatore:

#### Definizione 1.4.

Lo **zenit** è il punto della s.c.l. sopra la testa dell'osservatore.

Il **nadir** è il punto della s.c.l. posto sotto i piedi dell'osservatore (antipodale allo zenit).

Tali punti dipendono dalla posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre.

Per localizzare una stella nel cielo, dobbiamo definire quali siano le origini del **sistema di coordinate alt-azimutale**.

#### Definizione 1.5.

Il *piano di riferimento*: piano tangente alla Terra che passa per l'osservatore, incrocia la sfera celeste all'orizzonte.

Il *Meridiano locale*: cerchio verticale passante per i poli celesti e lo zenit. Le intersezioni con il piano di riferimento di questo meridiano ci forniscono i punti cardinali del Nord e del Sud.

**Definizione 1.6.** Possiamo quindi definire tali coordinate:

- **Azimut A**: angolo tra la verticale del corpo e il punto cardinale S, in senso orario; valori in  $[0^\circ, 360^\circ]$
- **Altezza a**: angolo tra l'orizzonte e il corpo sul Meridiano locale; valori in  $[-90^\circ, +90^\circ]$

Alternativamente viene usata la distanza dallo zenit:  $z = 90^\circ - a$ .

I limiti di questo SdR sono intrinseci della sua definizione, poiché dipendenti localmente dall'osservatore, rendendoli inutilizzabili da un'altro osservatore in un altro luogo del pianeta. Le coordinate alt-azimutali devono essere rese universali e trasferibili.

### 1.1.2 Sistema Equatoriale

Il *Sistema Equatoriale* usa due grandezze chiamate l'**ascensione retta** e la **declinazione**, per localizzare in modo univoco oggetti nel cielo notturno, indipendentemente dalla posizione dell'osservatore sulla Terra. Come prima, partiamo definendo alcuni punti per orientarci:

**Definizione 1.7.** La Terra ruota attorno al proprio **asse di rotazione** in 24h circa (per la precisione 23 ore, 56 minuti e 4 secondi); allungando in entrambe le direzioni tale asse incrociamo la s.c.g. in 2 punti detti *Polo Nord Celeste* e *Polo Sud Celeste*; allo stesso modo proiettando l'**Equatore** individuiamo l'*Equatore Celeste*.

Siamo tornati ad avere una sfera, coi poli ed un equatore, l'unica differenza col sistema visto per localizzare i punti sulla Terra è il movimento: la Terra si muove, e quindi il cielo che vediamo continua a spostarsi; ci serve allora un modello per fare in modo che sia possibile scegliere delle origini dalle quali calcolare le posizioni tenendo conto del movimento del cielo.

Definiamo un altro piano fondamentale:

**Definizione 1.8.** L'**Eclittica** è la posizione *apparente* del Sole sulla sfera attraverso le *costellazioni zodiacali*, percorsa in un anno, dovuto al moto di rivoluzione della Terra e coincide col piano orbitale terrestre attorno al Sole.

Poiché l'asse terrestre, e di conseguenza anche quello Celeste, è inclinato di  $23^\circ 27'$ , avremo 2 punti di intersezione tra Equatore Celeste ed Eclittica, che corrispondono agli *equinozi*. Uno di questi punti è detto:

**Definizione 1.9.** Il **Punto Gamma**  $\gamma$  è l'intersezione primaverile tra Equatore Celeste ed Eclittica; è il punto di riferimento per le **coordinate equatoriali** e individua il **Meridiano** di origine che passa per i Poli celesti e il Punto Gamma.

**Definizione 1.10.** Possiamo quindi andare a definire le coordinate equatoriali:

- La **Declinazione**  $\delta$  è la distanza angolare di un punto rispetto all'Equatore Celeste. In gradi  $[0, 90]$  in direzione Nord e  $[-90, 0]$  in direzione Sud.
- L'**Ascensione Retta (R.A.)** è la distanza angolare della proiezione del punto sull'equatore dal punto gamma. Descritta in ore, minuti e secondi da  $\gamma$  e crescendo verso Est.

Mentre la  $\delta$  di un oggetto ci permette di conoscere su quale cerchio si sta muovendo, il punto  $\gamma$  si muove in cielo durante la notte a causa della rotazione terrestre, quindi non possiamo usare la R.A. per trovare l'oggetto. Necessitiamo di una coordinata locale legata alla R.A.: partendo dal meridiano Sud, definiamo l'**angolo orario**<sup>1</sup>  $h$ , misurato in senso orario.

L'angolo orario del punto  $\gamma$  si chiama **tempo siderale**<sup>2</sup>  $\Theta$  e vale  $\Theta = h + R.A.$ . Perciò il tempo siderale lo otteniamo puntando una stella di R.A. e  $\delta$  note e, leggendo  $h$  sulla ruota oraria del telescopio, possiamo applicare la formula.

## 1.2 I telescopi

Per il nostro studio di interesse, ci concentreremo sui telescopi che vengono utilizzati nell'*Astronomia ottica*[3], in quanto la problematica che andremo ad affrontare riguarda lo studio da Terra.

I *telescopi* sono sistemi ottici[4]: combinazioni di *lenti*, diaframmi, *specchi*, che hanno lo scopo di raccogliere e focalizzare la luce su uno strumento che la analizzi. Le *lenti* sono oggetti trasparenti con due superfici (due curve o una piana e una curva); esse modificano la traiettoria dei raggi luminosi che le attraversano. Nello specifico, una **lente sottile**[5] è senza spessore o con spessore irrilevante, rispetto alla lunghezza focale e ai raggi di curvatura delle sue superfici. Una lente convergente<sup>3</sup> sottile può essere usata come obiettivo, con lo scopo di focalizzare la luce proveniente da un oggetto distante su uno schermo:

**Legge delle lenti sottili:** Dato un oggetto AB (stilizzato con un segmento, Figura 1.1) ad una distanza  $p = AO$  dal centro ottico di una lente convergente e

<sup>1</sup>distanza angolare, misurata sull'Equatore Celeste, tra il meridiano dell'osservatore e il meridiano di R.A. dell'oggetto osservato.

<sup>2</sup>tempo intercorrente tra due passaggi consecutivi del punto  $\gamma$  sul Meridiano Locale.

<sup>3</sup>più spesse al centro rispetto ai bordi, fanno convergere in un solo punto i raggi rifratti dei raggi che corrono paralleli all'asse principale.

sia  $f$  la distanza focale della lente, allora l'immagine  $A'B'$  si formerà ad una distanza  $q = A'O$  secondo la formula

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

$\frac{1}{f}$  viene chiamato potere diottrico, si misura in  $m^{-1}$  o diottrie.

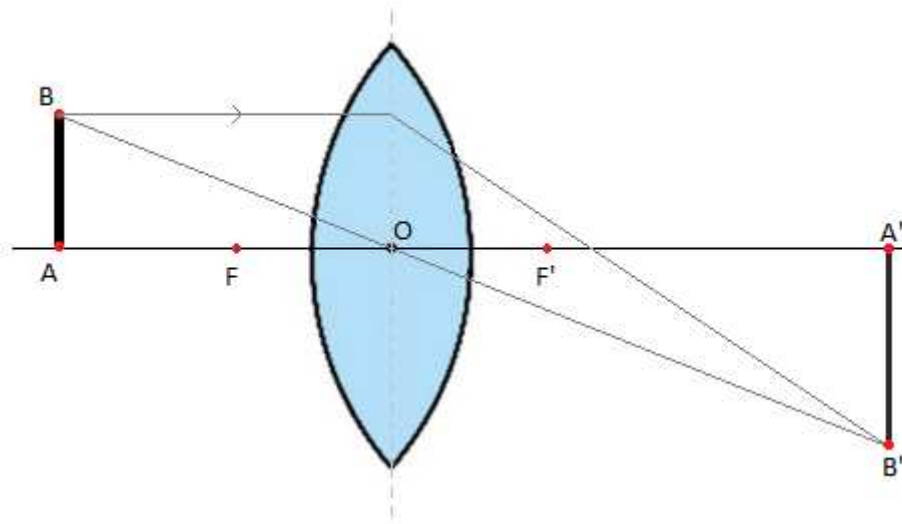


Figura 1.1: Legge delle lenti sottili[6]

Quando osserviamo un oggetto all'infinito ( $\frac{1}{p} \rightarrow 0$ ), come ad esempio una stella, il fronte d'onda<sup>4</sup> che arriva sulla lente lo approssimiamo ad un piano, e i raggi si considerano paralleli, allora l'immagine si formerà nel fuoco.

In tutti i telescopi moderni vengono utilizzati oramai solo gli specchi; per essi valgono leggi dell'ottica simili a quelle delle lenti con alcune differenze dovute alla natura riflettente degli specchi. (Ad esempio l'*equazione degli specchi* è simile alla *legge delle lenti sottili*).

Come dicevamo, i telescopi hanno 2 importanti scopi:

- la prima è di *raccogliere luce*: quanto maggiore è l'area dello specchio, tanto maggiore sarà la quantità di luce che raccoglie, permettendo l'osservazione di oggetti anche molto deboli.
- la seconda è di *migliorare la risoluzione angolare*  $R$  delle osservazioni: dipende dal diametro del telescopio  $R \sim \frac{\lambda}{D}$  con  $\lambda$  lunghezza d'onda della luce.

<sup>4</sup>l'insieme di tutti i punti che vibrano allo stesso modo in fase fra loro

Il **telescopio ottico** è uno strumento per le osservazioni astronomiche nel dominio delle radiazioni elettromagnetiche visibili. Può essere realizzato con lenti (rifrattore) oppure con specchi (riflettore) oppure con schema misto. Il telescopio rifrattore utilizza il fenomeno della rifrazione per focalizzare l'immagine, mentre quello riflettore utilizza la riflessione per focalizzare.

### 1.2.1 Le Aberrazioni, Ottica Attiva e Ottica Adattiva

Tuttavia esistono diversi fattori che introducono distorsioni/deformazioni nell'immagine creata (chiamate *aberrazioni*), dovute sia a deformazioni meccaniche sia alla turbolenza atmosferica; tali distorsioni possono essere efficacemente ridotte utilizzando specchi controllati da computer (*ottica attiva e/o adattiva*) che regolano la loro forma in tempo reale per ottimizzare l'immagine risultante sul piano focale.

L'ottica attiva e l'ottica adattiva sono entrambe tecnologie che mirano a correggere le aberrazioni ottiche, ma si concentrano su tipi diversi di aberrazioni.

L'**ottica attiva** (Ac.O) corregge principalmente le aberrazioni intrinseche dei componenti ottici, come le deformazioni o le imperfezioni nella forma degli specchi o delle lenti. Esse possono essere dovute a difetti di fabbricazione, a distorsioni causate dalla gravità o dalle variazioni di temperatura.

Vengono classificate in ordini:

0 fronte d'onda piano indisturbato;

1 fronte d'onda piano ma inclinato rispetto all'asse ottico ("Tip-Tilt");

2 fronte parabolico in entrambi gli assi o in uno solo che produce sfocamento e l'astigmatismo;

3 esprime il coma e l'aberrazione a trifoglio;

4 definisce l'aberrazione sferica;

5+ deformazioni più complesse (senza nomi)[7].

Vediamo alcuni tipi di aberrazione ottica, che ci torneranno utili più avanti:

- *aberrazione sferica*: causa una focalizzazione non uniforme dei raggi di luce sulla superficie dell'immagine; di conseguenza, i punti dell'immagine possono apparire sfocati o distorti, specialmente nelle aree periferiche;
- *coma*: causa una deformazione delle immagini stellari o puntiformi, facendole apparire a forma di "coma" con una coda che si estende dalla loro posizione; essa è dovuta al fatto che i raggi di luce incidenti sulla periferia del sistema ot-

tico vengono focalizzati in punti diversi rispetto a quelli che passano attraverso il centro, creando effetti simili a "code" luminose;

- *astigmatismo*: causa una deformazione delle immagini puntiformi in linee allungate o ellittiche, anziché punti nitidi.

Il funzionamento dell'Ac.O coinvolge generalmente i seguenti passaggi:

*All'interno dello specchio/lente, sono presenti piccoli attuatori che permettono il movimento della superficie del componente ottico in risposta a segnali elettrici.*

*Vi sono poi dei sensori ottici per monitorare le deformazioni o le aberrazioni presenti nel sistema ottico; essi rilevano le variazioni nella forma del componente ottico e forniscono un feedback al sistema di controllo. I dati provenienti dai sensori vengono elaborati da questo sistema di controllo che ne calcola le correzioni necessarie per eliminare le aberrazioni rilevate, generando poi i segnali elettrici per gli attuatori. Tale processo di misurazione e correzione delle aberrazioni è continuo e avviene in tempo reale; vengono effettuati cicli di feedback costanti per mantenere la forma desiderata del componente ottico e garantire la massima precisione nelle osservazioni.[8]*

L'**ottica adattiva** (Ad.O) è una sottocategoria specifica dell'ottica attiva, che mira alla correzione dell'aberrazione atmosferica nei telescopi terrestri. È conosciuta con il nome di **seeing**; tutte le osservazioni astronomiche effettuate da terra ne soffrono, infatti il fronte d'onda attraversa strati ad alto **indice refrattivo** venendo ritardato, passando da piatto a deformato. Oltre a ciò si aggiungono gli strati d'aria con differente temperatura e densità; poiché l'atmosfera è sempre in movimento, un'immagine puntiforme varierà in forma, posizione e sfocatura in base alle condizioni del seeing. Tali variazioni sono riconducibili agli ordini visti in precedenza. Per correggerle, il sistema di un Ad.O si compone di correttore, sensore di fronte d'onda e ricostruttore. In sintesi, il processo si svolge così:

*Il fronte d'onda dell'oggetto attraversa il sistema ottico e incontra il correttore (specchio deformabile), successivamente il segnale viene separato da un Beam Splitter (Divisore di fascio) che lascia passare il segnale diretto al CCD<sup>5</sup> di ripresa deviando la parte restante verso il sensore che analizza il fronte d'onda.*

*Analizzando il segnale dell'oggetto di interesse, si ricavano le informazioni riguardanti le deformazioni dell'onda, le quali vengono trasferite al ricostruttore*

---

<sup>5</sup>dispositivo ad accoppiamento di carica

*che calcola la “forma” di correzione delle deformazioni che il correttore deve assumere, deformandosi poi secondo tali informazioni.[9]*

*Osservazione.* Il fenomeno della ”rotazione di campo” è dovuto alla natura della montatura (alt-azimutale) stessa, che segue il movimento dell’oggetto osservato lungo gli assi azimutale e di altitudine, ma non compensa completamente il movimento della sfera celeste. Seguendo il moto apparente di un oggetto celeste, il campo visivo del telescopio sembrerà ruotare mentre l’oggetto si sposta attraverso il cielo (particolarmente evidente quando si osservano oggetti vicini all’orizzonte). Tale rotazione è dovuta al fatto che gli assi di movimento della montatura alt-azimutale (azimut e altitudine) non sono allineati con quelli di rotazione della sfera celeste (ascensione retta e declinazione), facendo apparire la sfera celeste come una volta celeste semi-sferica e il movimento dell’oggetto nella volta segue curve apparenti a causa della rotazione terrestre.

### 1.3 Osservatorio Vera C. Rubin

Passiamo ora a prendere in considerazione l’*Osservatorio Vera C. Rubin*<sup>6</sup>, situato in Cerro Pachon (Cile), attualmente in costruzione (Figura 1.3), che andrà a fare parte dell’*Osservatorio di Cerro Tololo* (comprende già il Gemini South ed il Southern Astrophysical Research Telescope); è progettato per monitorare, ogni notte per dieci anni, l’intera volta celeste dell’emisfero australe in sei filtri ottici<sup>7</sup> che comprendono tutta la banda ottica, più parte dell’ultravioletto e infrarosso. Ogni immagine prodotta coprirà un’area equivalente a 40 lune piene e il telescopio di 8,4 metri potrà spostarsi tra diverse posizioni in meno di cinque secondi. In questo modo si potrà scandagliare l’intero cielo visibile ogni 3-4 notti. Questo renderà l’*Osservatorio Rubin* particolarmente utile nel rilevare oggetti che cambiano in luminosità, come le supernove, o in posizione, come gli asteroidi. Inoltre grazie al potere di raccolta della luce e della fotocamera sensibile potremo scoprire circa 20 miliardi di galassie e un numero simile di stelle.

---

<sup>6</sup>Vera Rubin (1928-2016) è stata un’astronoma statunitense famosa per le sue ricerche sulla rotazione delle galassie e l’evidenza dell’esistenza di materia oscura nell’universo. Il suo lavoro è stato rivoluzionario per la nostra comprensione della struttura dell’universo e ha aperto nuove prospettive sulla sua composizione.

<sup>7</sup>dispositivo che viene utilizzato in ottica per selezionare o bloccare specifiche lunghezze d’onda della luce, consentendo solo determinate bande di frequenza a passare attraverso di essi.



Questo *Osservatorio* sarà composto da:

- la **cupola** è la parte mobile dell'involucro del telescopio alta circa 27 metri e con un diametro di 30 metri.
- il **Simonyi Survey Telescope**, un telescopio *riflettore* ad ampio campo con uno specchio primario di 8,4 metri, che utilizza un nuovo design a tre specchi detto di tipo *Paul-Baker*, dove è stata adottata un sistema di *ottica attiva* (non adattiva)
- una **fotocamera CCD** da 3,2 gigapixel, la più grande fotocamera digitale mai costruita.
- la **montatura alt-azimutale** progettata per essere compatta e per poter variare il puntamento di  $3,5^\circ$  in meno di 4 secondi per consentire la ripresa di scatti dell'immagine del cielo.

Il *Telescopio di tipo Paul-Baker* (Figura 1.2) utilizza tre specchi asferici curvi che aiutano a ridurre tre tipi di aberrazioni ottica: *aberrazione sferica*, *coma* e *astigmatismo*. Lo specchio *primario* M1, di 8,4m di diametro, riflette la luce verso quello secondario e convesso, M2 di 3,4m; quest'ultimo riflette la luce verso lo specchio terziario M3, di 5m di diametro, posto al centro di M1. La radiazione luminosa passa nella telecamera situata tra gli specchi M2 e M3, composta da tre lenti (L1, L2 e L3) per correggere le aberrazioni. Arriva poi al sensore del diametro di 64cm posto su un piano focale piatto. Il 63% della luce raccolta raggiungerà il sensore per il campo visivo di  $1,4^\circ$  e il 57% su tutto il campo visivo ( $3,5^\circ$ ).

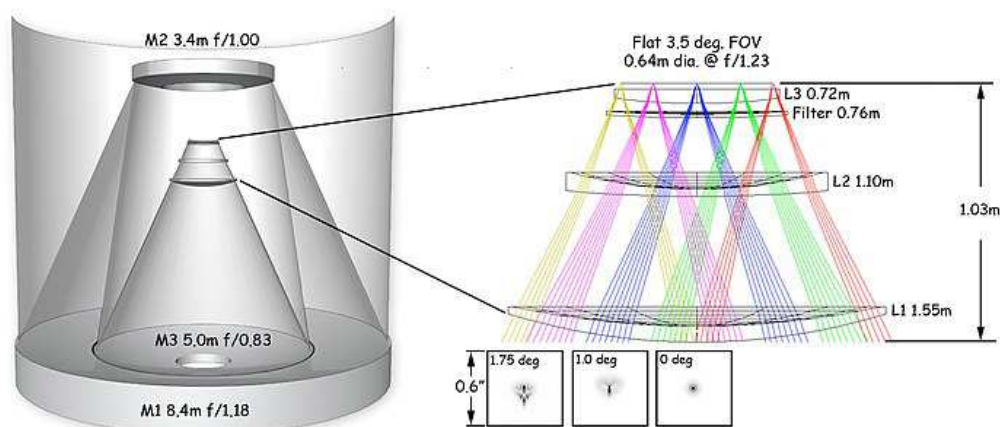


Figura 1.2: Telescopio di tipo Paul-Baker[2]

L'*Osservatorio Vera C. Rubin*[10] è stato progettato per aiutare la comunità scientifica in quattro settori:

- Indagare sulla natura della materia oscura e dell'energia oscura;
- Creare un inventario del Sistema Solare;
- Mappare la Via Lattea;
- Esplorare oggetti che cambiano posizione o luminosità nel tempo, detti "transitori".

### 1.3.1 Energia e Materia Oscura

Usando i telescopi per osservare il cielo troviamo miliardi di galassie; queste non sono distribuite casualmente in tutto l'Universo, ma seguono una struttura guidata dalla forza di gravità e dalla presenza della *materia oscura*. Viene chiamata così perché è tutto ciò che sappiamo: è una particella nell'Universo che ha massa e non emette né riflette luce. Non siamo ancora stati in grado di vedere direttamente una di queste particelle anche se costituiscono più dell'80% di tutta la materia nell'Universo. Tuttavia, ciò che possiamo vedere è l'*effetto gravitazionale* che ha sulle galassie, sulla loro distribuzione, sulla loro formazione e sul modo in cui si aggregano formando la struttura più grande dell'Universo: la *rete cosmica*. La materia oscura, al passare del tempo, tende ad aggregarsi assieme per formare strutture sempre più grandi. La sua distribuzione nell'Universo guida quella delle galassie: dove c'è più materia oscura ci saranno ammassi di galassie più massicci, e dove non c'è materia oscura ci saranno dei vuoti. Quindi studiando come sono distribuite le galassie in cielo, possiamo capire dove si trova la materia oscura, e derivare il suo effetto sull'evoluzione delle galassie.

### 1.3.2 Il Sistema Solare

L'*Osservatorio Rubin* scatterà immagini dell'intera volta celeste australe ogni poche notti, più volte per dieci anni. Con così tante immagini ripetute, potremo sapere com'è solitamente il cielo, notando quando avvengono cambiamenti in luminosità o posizione. Gli scienziati utilizzeranno software per identificare gli oggetti vaganti del Sistema Solare e studiarne le proprietà come dimensione, composizione e percorsi orbitali attorno al Sole. L'*Osservatorio* riuscirà a rilevare oggetti deboli, trovando più oggetti del Sistema Solare rispetto a quelli conosciuti finora. Con tali

informazioni, gli scienziati potranno classificarli in diversi gruppi e scoprire meglio come il Sistema Solare è arrivato all'aspetto attuale.

Molte scoperte si concentreranno su oggetti vicini alla Terra (ad esempio quelli in rotta di collisione con noi). Le scoperte di *Rubin* porteranno a scoprire oggetti anche molto piccoli (140m), attualmente difficili da rivelare dagli scienziati.

Altri oggetti rilevabili saranno nella fascia di asteroidi tra Marte e Giove: piccoli e deboli asteroidi, utili agli scienziati per capire come gli oggetti si sono scontrati dividendosi nel corso della storia del Sistema Solare.

Un terzo gruppo di oggetti si troverà nella *fascia di Kuiper*<sup>8</sup>: tale regione è fondamentale per studiare l'ambiente in cui si è formato il Sistema Solare, perché è più lontano dalla gravità e dalle influenze delle radiazioni. Essendo oggetti deboli e lontani, solo grazie alla capacità di *Rubin* gli scienziati troveranno più oggetti nella fascia di Kuiper che mai.

### 1.3.3 La Via Lattea

La Via Lattea è la galassia in cui si trova il nostro sistema solare. È una vasta struttura a forma di disco composta da stelle, gas, polveri e oggetti celesti come pianeti, asteroidi e comete. Ora immaginiamo che vi sia una galassia “compagna” più piccola che orbita attorno alla Via Lattea. Tale galassia non ha abbastanza energia per continuare il suo movimento orbitale. A causa della gravità la Via Lattea e la compagna si avvicinano, fino a scontrarsi e fondersi. La gravità della Via Lattea è così forte da iniziare a “fare a pezzi” la galassia compagna, le sue stelle vengono trascinate in flussi così lunghi da avvolgere interamente la nostra galassia, portando alla scomparsa della galassia compagna come la conoscevamo. Non è più un singolo oggetto, ma le sue stelle continueranno a creare scie ancora e ancora. Gli scienziati possono determinare quanto fosse grande la galassia compagna, quando si è formata e il percorso che ha seguito intorno alla Via Lattea osservando il numero di stelle, la larghezza delle scie e i percorsi che queste seguono, oltre alle caratteristiche delle stesse stelle.

*LSST* misurerà con precisione le posizioni delle stelle e i loro moti propri; tramite queste informazioni sarà possibile determinare le traiettorie e le posizioni delle stelle negli “streams” stellari, ed identificare quali stelle sono parte di uno “stream” o di un altro.

Questi flussi stellari (streams) potranno essere usati per ricostruire la storia della

---

<sup>8</sup>un disco di asteroidi e comete più lontano dal Sole rispetto a Nettuno

formazione della Via Lattea; le scie trovate attualmente attorno alla Via Lattea sono 23, ma potrebbero essercene altre! La luce di una ex galassia si diffonde in questi sottili flussi (anziché essere concentrata in unico punto), che possono essere estremamente deboli e coprire una vasta area del cielo. L'*Osservatorio Rubin* aiuterà ad identificare e osservare questi flussi, aiutando gli scienziati a raccontarci la storia della nostra Via Lattea.

### 1.3.4 Eventi astronomici transienti

Guardando il cielo notturno, ci aspettiamo che rimanga sempre uguale: escludendo le fasi lunari o gli spostamenti dei pianeti, le stelle e tutto il resto dell'Universo sembrano rimanere costanti. La realtà è che l'Universo è pieno di oggetti in continuo mutamento, solo che i nostri occhi non sono abbastanza sensibili per rilevarli.

Grazie all'*Osservatorio Rubin* saremo in grado di vedere come appariva il cielo tre giorni fa, e tre settimane fa, e così via, scattando una nuova immagine, potremo subito notare se ci sono stati cambiamenti. Il software di elaborazione dati di *Rubin* identificherà qualsiasi cosa che sia cambiata in una nuova immagine dopo soli 60 secondi; riuscirà quindi ad identificare circa 10 milioni di cambiamenti nel cielo ogni notte. E che cosa troveremo nel cielo? Ad esempio, corpi del sistema solare che si muovono attraverso il cielo, che potremo seguire. Ma la maggior parte delle scoperte saranno legate ad oggetti che variano in luminosità. I più numerosi che ci si aspetta di individuare sono tutti i tipi di supernovae<sup>9</sup> e altre stelle variabili<sup>10</sup>. Esse sono relativamente comuni, ma a volte oggetti o eventi più esotici illuminano le loro parti del cielo: la fusione di dense stelle di neutroni, buchi neri che inghiottono il gas o stelle, ...

### 1.3.5 Problematiche

Perché ci siamo focalizzati su questo osservatorio? Anticipiamo brevemente gli argomenti che tratteremo nel 2° capitolo, dove verranno esposti in maniera più espansiva.

La comunità scientifica, in particolare, dell'*Osservatorio Vera C. Rubin* è molto

---

<sup>9</sup>enormi esplosioni cosmiche provenienti dalla morte di una stella massiccia o dal collasso di un denso residuo stellare come una nana bianca. Esploendo vengono prodotti tutti gli elementi più pesanti del ferro, influenzano la forma delle galassie e formano stelle. Sono utili a capire anche l'espansione dell'Universo.

<sup>10</sup>cambiano di luminosità lentamente e regolarmente

preoccupata per l'aumento di costellazioni di satelliti per comunicazioni in orbita terrestre bassa (LEO): i satelliti si illuminano perché riflettono la luce del Sole, e, "attraversando" le immagini ottenute dal telescopio, mettono a rischio le scoperte previste una volta che le operazioni scientifiche inizieranno nel 2024. Poiché questo osservatorio è unico rispetto a queste costellazioni di satelliti, il team scientifico sta cercando strategie di mitigazione per ridurre l'impatto dei satelliti sulle ricerche. Le simulazioni della cadenza di osservazione *LSST* e dell'intera costellazione di 42.000 satelliti *SpaceX* (pianificati) mostrano che ben il 30% di tutte le immagini conterrebbe almeno una traccia di satelliti *Starlink*. [11]

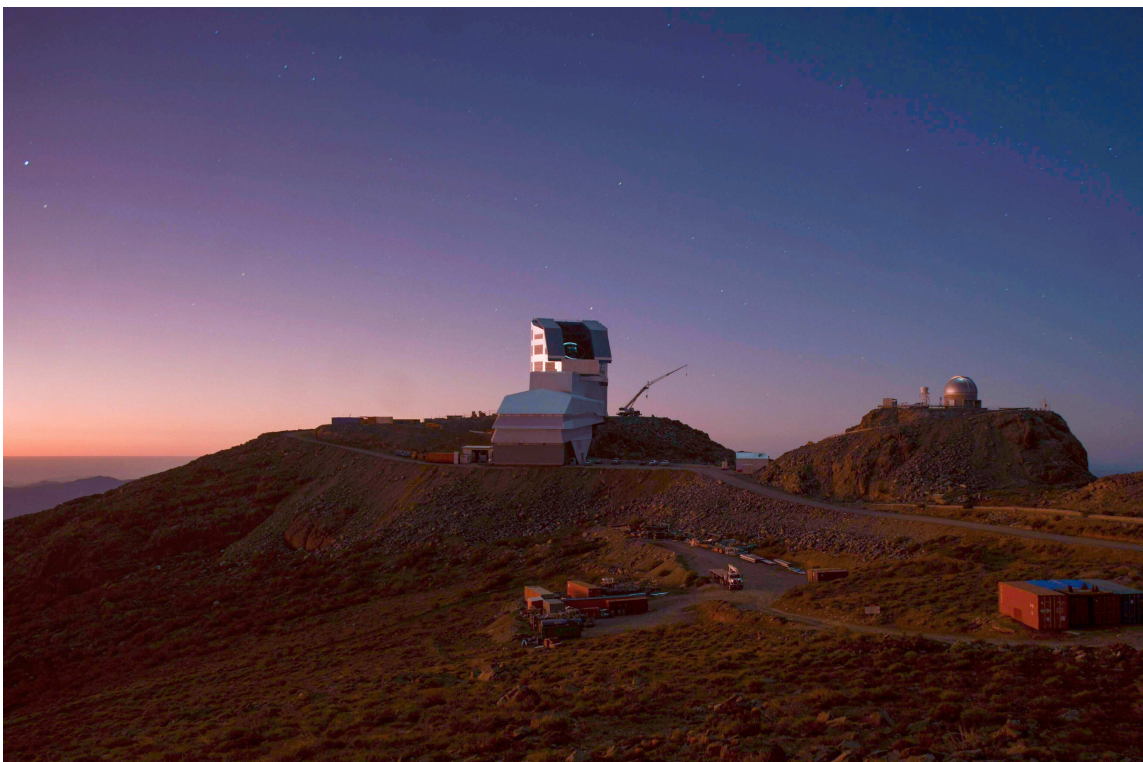


Figura 1.3: Osservatorio Vera C. Rubin (in costruzione)[12]



# Capitolo 2

## Satelliti

### 2.1 Descrizione

Questo studio ha l'obiettivo di quantificare l'effetto delle grandi quantità di satelliti sulle osservazioni astronomiche da Terra. Cominciamo quindi a capire di chi parleremo lungo tutto questo capitolo.

**Definizione 2.1.** Un **satellite** è un oggetto che orbita attorno a un corpo celeste più grande, come un pianeta o un asteroide, in un percorso regolare e stabile; possono essere di due tipi principali:

1. *Satelliti naturali*: corpi celesti che orbitano attorno a un pianeta o a un altro corpo celeste in modo naturale, ovvero non creati dall'uomo. L'esempio più banale di satellite naturale è la Luna, che orbita attorno alla Terra.
2. *Satelliti artificiali*: oggetti creati dall'uomo e lanciati nello spazio, tramite razzi, per svolgere diverse funzioni, come telecomunicazioni, osservazioni terrestri, esplorazione spaziale, meteorologia, navigazione, ricerca scientifica e molto altro. Vengono posizionati in orbite specifiche per svolgere il loro scopo e possono essere di diverse forme e dimensioni.

Vediamo le principali funzioni dei satelliti artificiali[13]:

- *Satelliti di telecomunicazione*: utilizzati per trasmettere segnali di comunicazione, come la televisione, la radio, la telefonia mobile e internet, da una parte del globo all'altra. Posizionati in orbite geostazionarie per rimanere sopra una posizione fissa sulla Terra rispetto alla sua rotazione.

- *Satelliti meteorologici*: impiegati per monitorare le condizioni meteorologiche, fornendo immagini e dati per le previsioni meteorologiche e il monitoraggio del clima.
- *Satelliti di osservazione della Terra*: utilizzati per catturare immagini ad alta risoluzione e dati della superficie terrestre per scopi di mappatura, monitoraggio ambientale, agricoltura, gestione delle risorse. . .
- *Satelliti di navigazione*: formano reti come il *Global Positioning System* (GPS) per fornire informazioni di posizionamento, navigazione e temporizzazione a livello globale.
- *Satelliti scientifici*: progettati per esperimenti e ricerche scientifiche nello spazio.
- *Satelliti di sorveglianza e sicurezza*: impiegati per attività di sorveglianza, intelligence e sicurezza, per la raccolta di informazioni militari e l'osservazione di eventi globali.
- *Satelliti di lancio e manutenzione*: utilizzati per effettuare lanci di veicoli spaziali o fornire servizi di manutenzione, quali la riparazione e l'estensione della vita operativa di altri satelliti nello spazio.

### 2.1.1 Orbite

Vediamo come si muove un satellite lungo la sua orbita, che consideriamo circolare[14]. Indichiamo con

$\mathbf{v}$  la velocità del satellite

$m$  la massa del satellite

$R$  la distanza satellite - centro del pianeta

$M$  la massa del pianeta

$G$  la costante di gravitazione universale

Dal *secondo principio della dinamica*,  $F = ma$ , sostituiamo al posto di  $F$  la **forza di gravità** che agisce sul satellite e al posto di  $a$  la sua **accelerazione centripeta**:

$$G \frac{mM}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad \Rightarrow \quad v^2 = G \frac{M}{R} \quad (2.1)$$



Possiamo ricavare a questo punto:

- la **velocità**:  $v = \sqrt{G\frac{M}{R}}$
- il **periodo**:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}$

*Osservazione.* 1. i satelliti più lontani dal centro del pianeta ruotano più lentamente

2. i satelliti più lontani dal centro del pianeta, impiegano più tempo per compiere un'orbita intera

Abbiamo detto che i satelliti orbitano attorno a un corpo celeste, diamo uno sguardo a quali sono i tipi di orbite in base all'obiettivo della missione, dalla copertura geografica desiderata e dalle esigenze tecnologiche. Le orbite più comuni sono:

1. *Orbite geostazionarie* (GEO): a una distanza di circa 35.790 km sopra l'equatore terrestre, in sincronia con la rotazione della Terra. I satelliti in GEO sembrano rimanere fermi rispetto a un punto fisso sulla superficie terrestre, rendendoli ideali per le comunicazioni;
2. *Orbite medie* (MEO): a una distanza compresa tra circa 2.000 e 35.790 km dalla Terra, utilizzate per sistemi di navigazione globale (GPS);
3. *Orbite basse* (LEO): a una distanza inferiore a circa 2.000 km dalla Terra, utilizzate per una vasta gamma di applicazioni, tra cui osservazioni terrestri, comunicazioni, rilevamento remoto e ricerca scientifica;
4. *Orbite ellittiche*: la loro altitudine varia lungo il percorso orbitale, possono essere utilizzate per scopi specifici, come l'osservazione polare o la copertura di diverse regioni della Terra;
5. *Orbite polari*: passano sopra i poli della Terra e consentono ai satelliti di coprire l'intera superficie del pianeta durante il loro viaggio da nord a sud; utilizzate per osservazioni scientifiche e di sorveglianza;
6. *Orbite sincrone al Sole* (SSO): caratterizzate da un angolo costante tra il piano orbitale e la direzione del Sole, consente ai satelliti di mantenere costanti condizioni di illuminazione mentre orbitano intorno alla Terra, rendendoli ideali per le missioni di osservazione terrestre e di rilevamento remoto.

### 2.1.2 Composizione

Un satellite artificiale è composto da diverse componenti e tecnologie progettate a seconda delle funzioni che deve svolgere durante la sua missione nello spazio.

Le principali parti che lo compongono sono:

- *Carico utile* (Payload): è la parte principale del satellite, dedicata a svolgere le funzioni specifiche della missione. Può essere un sensore, una telecamera, un dispositivo di comunicazione, uno strumento scientifico che soddisfi lo scopo della missione;
- *Struttura*: è il "guscio" del satellite che lo protegge e sostiene le altre componenti. È realizzata con materiali leggeri e resistenti (ex. fibra di carbonio);
- *Pannello solare*: per generare energia solare da trasformare in energia elettrica;
- *Sistema di controllo termico*: per mantenere la temperatura del satellite entro limiti accettabili, proteggendo le sue componenti dai cambiamenti di temperatura estremi nello spazio;
- *Sistema di comunicazione*: consente di trasmettere dati e informazioni alla Terra e ricevere comandi dalla stazione di controllo;
- *Sistema di propulsione*: per controllare l'orbita e la posizione del satellite nello spazio. Costituito da razzi a propellente chimico, propulsione elettrica o altri tipi di motori;
- *Sottosistemi di bordo*: comprendono le altre componenti elettroniche e informatiche per il funzionamento del satellite, come i computer di bordo, i sistemi di controllo elettronico, i sensori e le apparecchiature di telemetria;
- *Batterie*: Il satellite è dotato di batterie ricaricabili che immagazzinano l'energia prodotta dai pannelli solari per essere utilizzata durante i periodi in cui il satellite è nell'ombra della Terra.

## 2.2 SpaceX

**SpaceX** (nome completo *Space Exploration Technologies Corporation*)[15] è una compagnia aerospaziale fondata da *Elon Musk* nel 2002 con sede in California. La società è diventata subito nota grazie al suo approccio innovativo all'esplorazione

spaziale, per i suoi ambiziosi progetti volti a ridurre i costi e rendere l'accesso allo spazio più efficiente. L'obiettivo di Elon Musk per *SpaceX* è rendere l'umanità una *specie multi-planetaria*, cioè capace di vivere lontano dalla Terra, ad esempio su stazioni orbitali, sulla Luna e sugli altri pianeti, a partire da **Marte**. Vuole appunto ridurre di molto i costi e migliorare l'affidabilità dell'accesso allo spazio, rendendo i viaggi spaziali accessibili a un vasto pubblico. Una grande innovazione portata da *SpaceX* è la realizzazione di *razzi riutilizzabili*: dopo il lancio, gli *stadi inferiori*<sup>1</sup> dei razzi tornano sulla Terra atterrando verticalmente per essere riparati e utilizzati in missioni future. Questo approccio ha consentito a *SpaceX* di ridurre drasticamente i costi dei lanci spaziali.

Oltre al *sogno* di colonizzare Marte, i principali progetti della compagnia americana sono:

- **Starship**: è un razzo completamente riutilizzabile per il trasporto di grandi carichi e passeggeri nello spazio. È concepito per diventare il veicolo principale per l'esplorazione umana su Marte e altre destinazioni del sistema solare; potrebbe essere utilizzato anche per missioni sulla Luna e viaggi interplanetari.
- **Crew Dragon**: è una navetta spaziale per il trasporto di astronauti verso e dalla *Stazione Spaziale Internazionale* (ISS); è il primo veicolo spaziale privato a trasportare equipaggio umano nello spazio.

Ma il progetto invece di cui andremo a trattare in questa tesi è:

- **Starlink**: formare una costellazione di satelliti, per fornire connessione Internet ad alta velocità in tutto il mondo, soprattutto nelle aree rurali e scarsamente collegate. Per questo motivo *SpaceX* sta lanciando migliaia di satelliti Starlink in orbita bassa per creare una *rete globale di comunicazione*.

### 2.2.1 Starlink - Storia e numeri

Il progetto *Starlink*[17] fu annunciato nel *gennaio 2015*, e nel *2016* venne creata una struttura dedicata a Redmond, vicino a Seattle. I piani prevedevano inizialmente di completare la realizzazione della costellazione entro il *2020*, ma i cambiamenti alle specifiche tecniche hanno ritardato il calendario. Nel *febbraio 2018*, furono lanciati due prototipi chiamati *Tintin A* e *Tintin B* per verificare le tecnologie che

---

<sup>1</sup>costituiscono la prima porzione del razzo e contengono i motori principali responsabili della fase di decollo e del raggiungimento di un'altitudine iniziale.



Figura 2.1: Treno di luci catturato dal tracciatore di satelliti Marco Langbroek a Leida, Paesi Bassi, il 24 maggio 2019, appena un giorno dopo che SpaceX ha lanciato in orbita 60 dei satelliti Starlink per le comunicazioni internet.[16] *Credit* Marco Langbroek

sarebbero state utilizzate e per eseguire le attività di dimostrazione richieste dalla *Federal Communications Commission* (FCC). Nel *marzo 2018*, la FCC autorizzò il lancio di un terzo della costellazione, a condizione che i risultati dei test fossero soddisfacenti. A partire dal *maggio 2019*, *SpaceX* iniziò a lanciare le prime serie di satelliti *Starlink* in orbita bassa attorno alla Terra. I lanci vennero eseguiti utilizzando i razzi *Falcon 9*, trasportando contemporaneamente circa 60 satelliti in ogni missione. Con il passare del tempo, il numero di satelliti in orbita è aumentato notevolmente, portando a un aumento significativo della copertura globale e della capacità di connessione di *Starlink*: a *maggio 2023* contava 1,5 milioni di abbonati. Il progetto iniziale prevedeva di creare una costellazione di 4.425 satelliti, ma successivamente il numero venne aumentato a 12.000 (approvato nell'*aprile* del *2019*) per migliorare la copertura e la capacità del servizio Internet globale; ad *ottobre 2019*, la FCC ha presentato documenti all'ITU<sup>2</sup>, per conto di *SpaceX*, per aumentare di altri 30.000 satelliti la costellazione, da integrare ai 12.000 satelliti *Starlink* precedenti. Attualmente (agosto 2023), ci sono 4.661 satelliti *Starlink* in orbita, di cui 4.630 sono operativi, tra satelliti di generazioni diverse (*V1.0*, *V1.5* e la più recente *V2*). La versione "V1.0" è stata la prima generazione di satelliti a costituire la costellazione operativa di *Starlink* con una produzione pianificata di migliaia di unità. Dopo il lancio iniziale dei V1.0, *SpaceX* ha continuato a sviluppare e implementare miglioramenti tecnologici per i suoi satelliti: ad esempio, l'aggiornamento dei pannelli solari per aumentare la capacità di generazione di energia, miglioramenti ai sistemi di comunicazione elettronica e l'introduzione di dispositivi ionici per migliorare il controllo dell'orbita e l'efficienza operativa, arrivando alla versione "V1.5". La ge-

<sup>2</sup>Unione Internazionale delle Telecomunicazioni

nerazione “V2” o “Gen 2” è progettata per essere trasportata tramite *Starship*; in attesa del suo completamento, sono stati lanciati dei satelliti chiamati “V2 Mini” [18] muniti di propulsori Hall<sup>3</sup> all’argon per le manovre in orbita.[19]

### 2.2.2 Starlink - Visibilità

I satelliti *Starlink* sono posizionati in orbite basse attorno alla Terra con altezze che variano dai 340 ai 600 km. Diventano visibili perché riflettono la luce del Sole o altre fonti luminose e questa luce riflessa può essere sufficientemente intensa da essere rilevata da un osservatore sulla Terra. La visibilità di un satellite dipende da vari fattori, tra cui l’altitudine dell’orbita, la posizione del satellite rispetto al Sole e all’osservatore, e la fase di illuminazione del satellite. Al tramonto, quando il Sole si trova appena sotto l’orizzonte, i satelliti nella LEO ancora al di sopra dell’ombra terrestre possono essere illuminati dal Sole e diventare visibili, mentre nel cielo notturno completamente scuro, possono non essere visibili poiché non c’è fonte luminosa diretta che li illumina.

Grazie alla capacità senza precedenti di monitorare il cielo in modo ripetuto e approfondito, l’*Osservatorio Rubin* sarà un caso limite per la sensibilità delle osservazioni astronomiche alle costellazioni di satelliti. In una visita nominale di 30 secondi, i satelliti nella LEO percorrono circa 15 gradi attraverso il cielo (ovvero quasi quattro volte il diametro del campo visivo dell’*Osservatorio*) rimanendo visibili poco dopo il tramonto e prima dell’alba. Le simulazioni della cadenza di osservazione del *LSST* (*Large Synoptic Survey Telescope*) [11] e della futura costellazione di satelliti di *SpaceX* (al completo) hanno mostrato che fino al 30% di tutte le immagini *LSST* conterranno traccia dei satelliti *Starlink*. Tale traccia è nota come fenomeno delle “scie luminose”: mentre i satelliti attraversano il cielo, generano delle tracce luminose a causa della riflessione della luce solare sulla superficie dei loro pannelli solari e di altre superfici riflettenti. Queste scie potrebbero disturbare le immagini astronomiche e rendere difficile l’osservazione delle stelle e degli oggetti celesti.

---

<sup>3</sup>Un propulsore Hall (o propulsore Hall ionico) è un tipo di propulsore spaziale che utilizza il principio dell’effetto Hall per accelerare e ionizzare un fluido, generalmente un gas inerte come il xenon o l’argon.

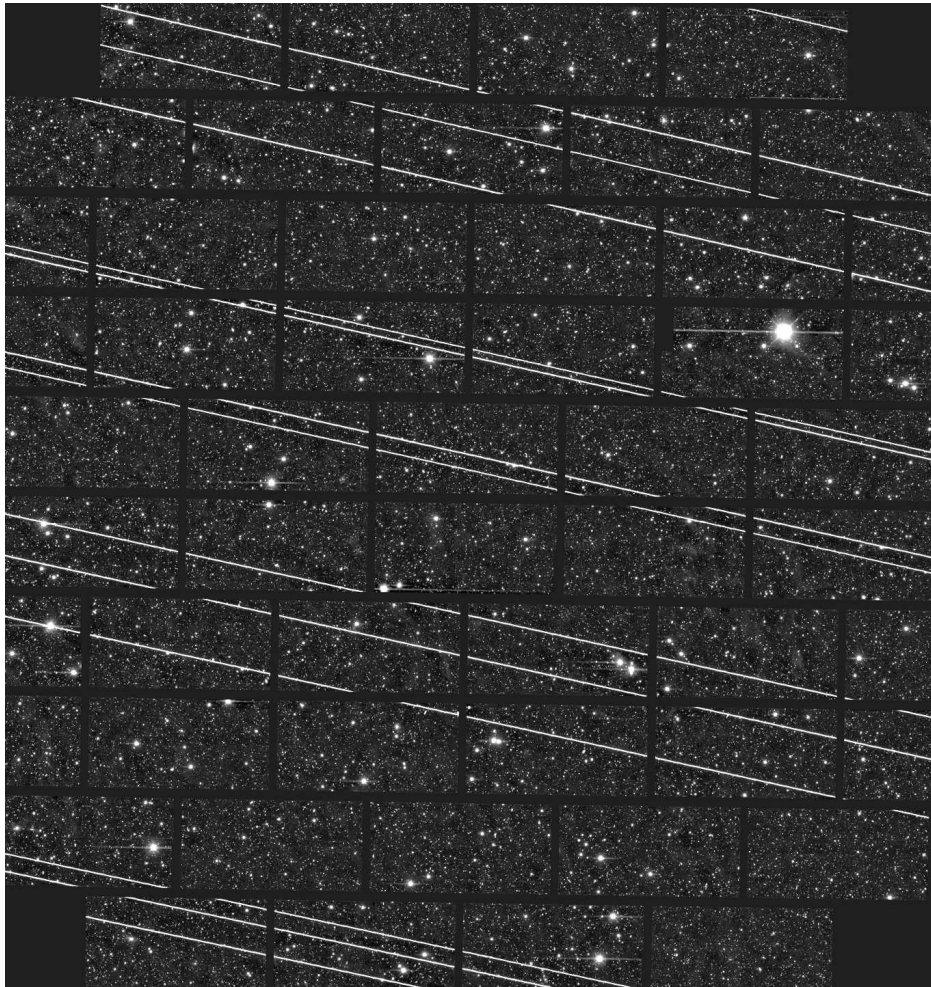


Figura 2.2: Immagine ottenuta presso l'Osservatorio Cerro Tololo (Cile) nel novembre 2019, in cui si vedono le tracce dei satelliti Starlink di SpaceX. *Credit* National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory/CTIO[20]

### 2.2.3 Starlink - Impatti e soluzioni

Utilizziamo *Starlink* come esempio generale per descrivere i problemi creati per la ricerca astronomica dalle costellazioni di satelliti, poiché certamente ne verranno create altre e ognuna avrà le proprie peculiarità.

*SpaceX* lavora su orbite "basse" per fornire un servizio veloce con tempi di latenza molto brevi per l'utente, tuttavia richiede un gran numero di satelliti, con riflessioni decisamente luminose (la luminosità è proporzionale all'inverso del quadrato della distanza). Già dal primo lancio di satelliti *Starlink* si sono sollevati segnali d'allarme per gli astronomi ottici, che, nonostante la costruzione di telescopi nei migliori luoghi del mondo, non si immaginavano di trovare complicanze anche dall'alto. Musk ha sottolineato che l'effetto del *treno di luci* (Figura 2.1) è temporaneo, poiché subito dopo il lancio i grandi pannelli solari vengono dispiegati nella configurazione parallela al suolo (detta "a libro aperto" Figura 2.3), quindi oltre alla luce riflessa dal satellite avremo anche quella riflessa dai pannelli solari; non appena viene raggiunta l'altezza prestabilita, la luminosità cambia poiché la configurazione iniziale passa a quella chiamata "a pinna di squalo" (perpendicolare alla precedente) Figura 2.3, nascondendo il pannello solare dietro il corpo del satellite, lasciando visibile solo la luce riflessa dal satellite (non ad occhio nudo).

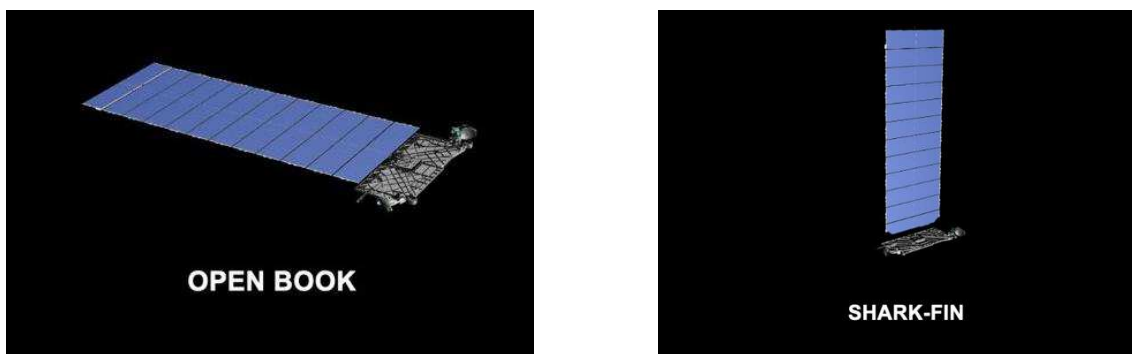


Figura 2.3: Configurazione "a libro aperto" (sx) e "a pinna di squalo" (dx)[21]

Tuttavia continueranno a comparire nelle immagini astronomiche, come detto precedentemente, nelle ore subito dopo il tramonto e prima dell'alba. A tal proposito, all'inizio di *gennaio 2020* è stato lanciato in orbita **DarkSat**[22], un satellite di prova verniciato di nero per essere meno riflettente. Dopo aver raggiunto la sua orbita, le misurazioni fatte hanno evidenziato un dimezzamento della riflettività; una buona notizia, ma non sufficiente a placare le preoccupazioni degli astronomi. L'oscuramento eseguito potrebbe non essere la soluzione più efficace: tramite l'oscuramento, i satelliti diventano più assorbenti di radiazione solare, che potrebbe

causarne il surriscaldamento, che porta a diventare più luminoso nelle lunghezze d'onda infrarosse, una parte dello spettro che interessa anche gli astronomi.

Come alternativa ulteriore a *DarkSat*, *SpaceX* ha sviluppato un sistema di *parasoli*, per impedire che il Sole al tramonto rifletta sulla superficie del satellite, chiamato **VisorSat**. A partire dall'*agosto 2020* *SpaceX* ha deciso di inviare in orbita solo satelliti dotati di parasole, a seguito di simulazioni, verificandone l'efficacia tramite dati raccolti tra *agosto* e *dicembre 2020*, e resi pubblici nel *gennaio 2021*. Tramite oltre 1000 misurazioni, la magnitudine media di un *VisorSat* è 5,93 rispetto al valore di 4,63 degli altri *Starlink*, riducendo la luminosità di circa il 30%, rendendo i *VisorSat* troppo deboli per essere visti dagli osservatori a occhio nudo. Gli astronomi sperano di raggiungere al più presto l'obiettivo di magnitudine 7.

*Osservazione.* La magnitudine di un corpo celeste è una misura della sua luminosità apparente vista dalla Terra; i corpi celesti più luminosi hanno magnitudini negative, mentre quelli meno luminosi hanno magnitudini positive. La magnitudine apparente di un corpo celeste dipende sia dalla sua luminosità intrinseca che dalla sua distanza dalla Terra. Quindi due stelle con la stessa luminosità intrinseca avranno magnitudini apparenti diverse se si trovano a diverse distanze dalla Terra.

Per stimare in modo oggettivo il deterioramento della qualità del cielo visibile a occhio nudo, la *NASA*<sup>4</sup> ha avviato un progetto di *Citizen Science* nel quale sono richieste fotografie dei satelliti *Starlink*, sia mentre formano treni che mentre si alzano e si separano l'uno dall'altro. Questo progetto si chiama *Satellite Streak Watcher*: fotografando il modo in cui le strisce prodotte dal passaggio dei satelliti varia nel tempo, la *NASA* mira a documentare l'aumento del numero di satelliti. Infatti, sono sufficientemente luminosi da comparire in foto con un telefono cellulare all'inizio e alla fine della notte. Recandosi su *Heavens-Above.com* è possibile selezionare *Starlink* dalla lista dei satelliti ed ottenerne l'elenco dei passaggi, con orario di transito e magnitudine. Con un'esposizione di 10s (sufficiente perché un satellite si muove di 1° al secondo) e ripetendo l'operazione per diversi mesi, si riuscirebbe a seguire l'evoluzione della situazione nel corso del tempo.

Assieme a questo progetto, più amatoriale, gli astronomi hanno lavorato per valutare l'impatto che queste costellazioni di satelliti avranno sulla raffinatezza dei valori raccolti dai loro telescopi; hanno preso in considerazione sia i telescopi con campi visivi "piccoli" che "grandi". Mentre per quelli "piccoli" l'influenza della presenza dei satelliti è minore (evitando di osservare l'area vicino all'orizzonte), per quelli "grandi",

---

<sup>4</sup>National Aeronautics and Space Administration



come ad esempio l'*Osservatorio Vera Rubin*, sarà difficile evitare i passaggi dei satelliti, in particolare per l'*Osservatorio V. R.* circa 1/3 delle immagini conterrà una scia difficilmente eliminabile tramite programmi di pulizia, perché troppo luminosa; eliminando la scia, perderemo tutte le informazioni reperibili dietro di essa. Perdere un'immagine su tre, non sapendo quanto dell'immagine rovinata possa essere salvato con determinati software (senza considerare il tempo di azione del software), è un problema attuale, su cui gli scienziati si stanno interrogando, perché avere una tecnologia avanzata se poi viene limitata da un'altra? Alcuni tentativi di trovare un compromesso ci sono già stati: dal programmare la sequenza di puntamento del telescopio per evitare i satelliti, al chiudere l'otturatore dello strumento (limitando la raccolta dati) durante il passaggio dei satelliti. Per far ciò è necessaria una conoscenza precisa dell'orbita di ciascun satellite; è stato quindi costruito *SatHub*, un archivio per la raccolta di informazioni rilevanti sulla crescente popolazione di satelliti. Tuttavia, con l'aumentare del numero di satelliti in orbita, visto il prospetto dei progetti futuri, questa soluzione sarà molto limitata; la via migliore resta quella di limitare la quantità di luce riflessa, ovvero la strategia attuale.

Le simulazioni effettuate hanno dimostrato che, in aggiunta alle caratteristiche fisiche del satellite, l'altezza dell'orbita (non dovrebbe superare i 600 km) è rilevante: in orbite ad un'altitudine superiore, i satelliti sono più lontani e più deboli, si muovono più lentamente, portando a scie meno evidenti rispetto a quelli in orbita bassa, ma rimangono visibili per tutta la notte. Le richieste fatte dagli astronomi sono quindi di ridurre la riflessività e di lavorare in orbita bassa.

Per fornire un servizio internet ottimale, i satelliti dovranno volare su ogni parte del pianeta, andando ad attraversare anche le aree più remote dove gli astronomi avevano trovato riparo dall'inquinamento luminoso. Ci ritroveremo con immagini sempre più attraversate da scie luminose difficilmente rimosibili tramite software.

#### 2.2.4 Ricerca di Asteroidi

La presenza, in continuo aumento, di satelliti in orbita penalizzerà ogni ramo della ricerca astronomica, a partire dalla ricerca di asteroidi pericolosi con orbite vicine alla Terra. I potenziali pericoli per noi derivano dagli asteroidi NEO (*Near Earth Objects*), ovvero che si muovono in orbite che intersecano quella della Terra.

*Osservazione.* Un asteroide è un corpo celeste roccioso o metallico che orbita attorno al Sole. Sono distribuiti principalmente nella regione tra Marte e Giove, nota come la "fascia degli asteroidi", ma possono essere trovati anche in altre parti del sistema

solare. La sua dimensione varia da piccole rocce a corpi di diverse centinaia di chilometri di diametro. La maggior parte degli asteroidi ha orbite stabili, ma alcuni possono avere orbite che li portano vicino alla Terra. Sono interessanti inoltre perché conservano informazioni sulla nascita e l'evoluzione del sistema solare.

Nell'arco di un anno, la quantità di detriti che colpiscono la Terra ammonta a 40.000 tonnellate, anche se in gran parte sono oggetti piccoli che si consumano nell'atmosfera. Quando una di queste rocce colpisce il suolo prende il nome di *meteorite*, indipendentemente dalla dimensione. La NASA investe molto nella ricerca ed individuazione degli asteroidi, attualmente se ne contano più di 25000 catalogati, soprattutto di piccole dimensioni; nessuno di essi è in rotta di collisione con la Terra, ma possono esserci asteroidi pericolosi sfuggiti al censimento.

Dove vanno cercati gli asteroidi più pericolosi? Si troveranno nel piano dell'eclittica in cui orbitano tutti i pianeti, ma questo ci porta a scandagliare il cielo verso l'orizzonte, dopo il tramonto e prima dell'alba, con telescopi ad ampio campo visivo; risulta quindi chiaro il problema, in questo campo, portato dai satelliti.

*Osservazione.* Gli asteroidi più difficili da catalogare si trovano solitamente nel piano dell'eclittica perché quelli che orbitano in questo piano sono soggetti all'influenza gravitazionale dei pianeti e possono subire deviazioni nella loro traiettoria a causa dell'interazione con essi. Gli oggetti in questa regione (consideriamo rispetto alla Terra) sono in movimento rapido, in particolare coloro che attraversano il cielo dopo il tramonto o prima dell'alba. In quel momento la luce solare riflessa dagli asteroidi può essere catturata dai telescopi, ma è anche lo stesso momento in cui sono più visibili i satelliti artificiali.

### 2.2.5 Non solo Astronomia - Ambiente

La presenza, in continuo aumento, di satelliti in orbite basse attorno a noi porterà ad un sovraffollamento portando con sé, oltre alla serie di problemi elencati in precedenza, anche un rischio di collisioni fra di loro. In seguito ad una collisione, si va a formare una nuvola di detriti che continuerà a viaggiare lungo la stessa orbita, aumentando la probabilità di altri impatti (*sindrome di Kessler*). Un esempio di collisione risale al 2009, quando un satellite *Iridium* si è scontrato con un *Kosmos* russo non più operativo, portando alla distruzione di entrambi ed alla creazione di una nuvola di detriti che impiegò mesi a decadere. Ciò che preoccupa maggiormente riguarda i satelliti guasti, non più manovrabili da terra, che continuano a viaggiare lungo la propria orbita.

In risposta a questo problema, Elon Musk ha progettato nei suoi satelliti un meccanismo di *anti-collisione* ed anche un sistema di *deorbitazione* alla fine del loro servizio. Tuttavia, essendo satelliti a basso costo, è possibile una percentuale di malfunzionamento, infatti alcuni dei suoi satelliti in orbita non rispondono ai comandi; il rallentamento dato dall'atmosfera li porterà ad essere raggiungibili per essere eliminati, lasciando comunque tracce non indifferenti.

Tramite i numerosi lanci, viene, e verrà, consumata una grande quantità di carburante: i satelliti *Starlink* utilizzano il cherosene, generano gas di scarico (ossidi di azoto e cloro) che reagiscono con lo strato di ozono, distruggendolo e assottigliando. La FCC, colei che ha approvato il pacchetto di satelliti *Starlink*, gode dell'esenzione dall'applicazione della NEPA (*National Environmental Policy Act*) tramite la *Categorical Exclusion*. Tale esenzione permette di evitare di valutare gli impatti ambientali delle sue decisioni; è stata istituita anni fa e si basava sulla convinzione che, le decisioni della FCC relative alle comunicazioni via satellite, non avessero un impatto ambientale rilevante.[23][24]

*Osservazione.* La "Categorical Exclusion" (CE) è un'eccezione che permette a determinate attività o azioni di essere esentate dall'obbligo di sottostare a una valutazione approfondita dell'impatto ambientale prima di essere autorizzate. È prevista dalla NEPA per semplificare il processo decisionale e accelerare l'approvazione di progetti o azioni che non sono ritenuti suscettibili di causare un impatto ambientale significativo. Nel caso delle costellazioni di satelliti come *Starlink* di *SpaceX*, molti astronomi e scienziati stanno sollevando preoccupazioni riguardo all'effetto su vari aspetti, come l'ambiente, l'astronomia e la qualità del cielo notturno, e stanno chiedendo una maggiore valutazione e regolamentazione.

## 2.2.6 Non solo Astronomia - Legislazione

Le autorizzazioni avute da *SpaceX* per il suo progetto *Starlink* sono arrivate dall'agenzia governativa americana FCC e tutti i lanci sono avvenuti su suolo americano; tuttavia sono arrivate diverse lamentele, dagli altri stati, perché le orbite dei satelliti *Starlink* attraversano tutti gli altri paesi del globo, i quali non sono coinvolti nelle autorizzazioni date. Viene appunto richiesto che tali decisioni (come per gli altri progetti) vengano gestite dalla UNOOSA (*United Nations Office for Outer Space Affairs*), un'agenzia dell'ONU che si occupa dei temi legati all'utilizzo pacifico dello spazio extra-atmosferico. Esiste infatti un documento, il *Trattato sullo Spazio Esterno*, in cui sono indicati diversi aspetti dell'uso dello spazio, tra cui il **Divieto**

**di sovranità** (OST), ovvero, esso stabilisce che lo spazio extra-atmosferico (tra cui la Luna e gli altri corpi celesti) non possa essere oggetto di appropriazione nazionale; nulla viene detto sull'occupazione delle orbite circumterrestri, sulla riflettività dei satelliti o sulla salvaguardia dell'astronomia. Questo perché l'OST fu negoziato negli anni '60, quando queste problematiche non esistevano, in quanto le operazioni nello spazio erano affidate solo alle agenzie spaziali, non ad aziende private. Ora, a seguito di tutti i progetti attivi, e in via di sviluppo, il Trattato dovrebbe essere aggiornato, apportando limitazioni sulla riflettività e controllare il numero di satelliti posizionabili in orbita.[25]

## 2.3 Punti di vista differenti fra astronomi

Le sensazioni degli astronomi e scienziati in merito al problema (che si dirama in molte conseguenze, come visto) sono di preoccupazione, sgomento e rabbia; tuttavia, esistono anche posizioni più ottimistiche. Vediamo ora le opinioni di due astronomi: *Stefano Gallozzi e Luigi R. Bedin*.

In un articolo pubblicato su *www.sait.it* all'interno di un dibattito sulle costellazioni di satelliti, a cui ha partecipato anche L. R. Bedin, Gallozzi ha espresso le sue preoccupazioni sull'aumento di satelliti in orbita terrestre bassa; sono suddivise in "ordini di ragione" tra cui morale, legale, finanziario, astronomico e ambientale. Sostiene appunto che:

- **morale:** Tutte le culture hanno potuto svilupparsi, godendo di un bene inalienabile, ovvero un cielo buio, classificato come *World Heritage*. Il nostro obiettivo è quello di preservare il più possibile il cielo notturno, rispettandolo per le generazioni future, senza impedire uno sviluppo tecnologico, ma attuandolo attraverso metodi più sostenibili;
- **legale:** Come detto nella sezione precedente, poiché i satelliti non saranno geostazionari bensì orbiteranno attorno al pianeta andando ad attraversare lo spazio aereo di nazioni diverse da quella che ne ha autorizzato il circolo.. Ad esempio gli USA, tramite la FCC, permettono a *SpaceX* l'immissione in orbita di tanti satelliti, "autorizzandolo" a passare sopra ad altre nazioni, che magari quel tipo di consenso non lo concederebbero; pensando anche ad utilizzi di tipo militare, permettere di fare questi lanci agli USA, permetterebbe implicitamente anche alla Russia, Cina, etc di fare tali spedizioni;

- **finanziario:** Le spese per tutti i progetti astronomici fatte finora, come ad esempio l'*Osservatorio Vera C. Rubin*, rischiano di diventare vane o infruttuose per via di queste costellazioni.
- **astronomico:** L'astronomia ottica da Terra potrebbe essere compromessa irrimediabilmente dalla grande e costante presenza di satelliti in LEO. Se si riuscisse, con tecniche avanzate, a ridurre il danno e continuare a lavorare, avremmo sempre immagini con una grande perdita di informazioni. *“Non si può ragionare come se l'astrofisica da Terra sia destinata all'estinzione”*, l'astrofisica da Terra e quella da Spazio devono essere complementari tra loro; un banale problema è, a livello tecnologico, *“l'impossibilità di testare le nuove tecnologie a Terra”* limitando lo sviluppo di quelle da spazio;
- **ambientale:** vedi Parte 2.2.5 *Non solo Astronomia - Ambiente*

Queste e altre ragioni sono esposte nel suo articolo **Le nuove Costellazioni Satellitari sono un pericolo per tutti noi (non solo per gli astronomi)**[26]; inoltre ha creato un *Appello Internazionale degli Astronomi*, firmato da più di 2000 colleghi da 50 nazioni diverse, e, per inserire una rappresentanza giuridica, ha dato vita ad una *Fondazione per la Salvaguardia del Cielo Astronomico*, per portare alle corti di giustizia statunitense tutte le criticità sul progetto delle mega-costellazioni e darne una regolamentazione.

Passiamo invece alla visione diametralmente opposta a quella appena vista, Luigi R. Bedin all'interno dello stesso dibattito ha pubblicato un articolo **Le nuove costellazioni nel cielo sono una cosa molto MOLTO positiva per tutti!**[27] esponendo in breve diverse argomentazioni. Sostiene infatti che le difficoltà espresse da altri colleghi in merito al problema delle mega-costellazioni siano evitabili, pianificando le osservazioni e prendendo i dati nel migliore dei modi, eludendo le interferenze e trattandoli come viene già fatto per la rimozione di asteroidi, aerei, raggi cosmici... Sostiene poi che il futuro dell'astronomia sia dallo spazio, su corpi celesti; *Starlink* renderà più accessibile lo spazio e permetterà la costruzione di nuovi telescopi spaziali, finanziando lo sviluppo della *Starship*. Il suo pensiero per le nuove generazioni ha un aspetto più razionale: osservare ad occhio nudo un satellite in movimento darà un senso fisico della velocità angolare e della distanza, sentendoci collegati come *“umano nello spazio”*. Inoltre, l'obiettivo principale è il collegamento globale a poche decine di millisecondi, portando internet nelle zone più remote del

mondo, anche nell'oceano, dando accesso alla cultura a tutti.

# Capitolo 3

## Numeri alla mano

### 3.1 Quantità progettate

Abbiamo visto nella Parte 2.2.1 *Starlink - Storia e numeri* alcuni valori del progetto, in questa sezione andremo più nel dettaglio, prendendo visione anche della loro divisione tramite i dati riportati nei documenti della FCC.

Il progetto *Starlink* presentato da Elon Musk nel 2015, prevedeva la divisione in due zone: la LEO (*Low Earth Orbit*) e la VLEO (*Very Low Earth Orbit*). I numeri approvati nel 2017 dalla FCC erano di 4425 satelliti in LEO e 7518 in VLEO[28], una volta combinati, avrebbero consentito a *SpaceX* di fornire una copertura completa e continua della Terra attraverso un angolo di elevazione<sup>1</sup> di almeno 35°.

Per quanto riguarda la costellazione LEO, era prevista una suddivisione dei satelliti in 5 altitudini diverse:

**Tabella 1 - Programmazione LEO 2017 (4425 satelliti)**

	<i>Altezza h</i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i>Piani orbitali</i>	<i>Satelliti per piano</i>	<i>n° Satelliti</i>
<i>Dispiegamento iniziale</i>	1150 km	53°	32	50	1600
<i>Dispiegamento finale</i>	1110 km	53.8°	32	50	1600
	1130 km	74°	8	50	400
	1275 km	81°	5	75	375
	1325 km	70°	6	75	450

**Nota:** L'inclinazione  $\phi$  rappresenta l'angolo fra l'orbita del satellite e l'Equatore terrestre.

---

<sup>1</sup>rappresenta l'altezza sopra l'orizzonte alla quale il satellite appare quando osservato da un punto specifico sulla Terra, a 0° il satellite è all'orizzonte, a 90° il satellite è allo zenit.

Per la costellazione VLEO era previsto un dispiegamento su una gamma di tre altitudini e tre angoli di inclinazione:

**Tabella 2 - Programmazione VLEO 2017 (7518 satelliti)**

<i>Altezza <math>h</math></i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i><math>n^\circ</math> Satelliti</i>
345.6 km	53°	2547
340.8 km	48°	2478
335.9 km	42°	2493

Il primo step era di testare un servizio *beta*, utilizzabile ad alte latitudini, attraverso l'utilizzo di 100 satelliti (zona: 4 dei 32 piani orbitali della LEO a 53° d'inclinazione). Successivamente, attraverso altri 700 satelliti (800 totali - zona: 32 piani orbitali con 25 satelliti per piano della LEO a 53° d'inclinazione), si sarebbe dovuto ottenere una copertura diffusa negli Stati Uniti e a livello internazionale, in grado di offrire un servizio commerciale di banda larga. Andando a completare il gruppo di satelliti LEO a 53° d'inclinazione si sarebbe ottenuto una connettività robusta a banda larga in tutto il mondo, andando a fornire un servizio nell'area compresa tra i 60 gradi di latitudine Nord e i 60 gradi di latitudine Sud. I restanti satelliti LEO avrebbero aumentato la portata del servizio anche alle zone polari e quelle escluse (sopra i 60N e sotto i 60S). La costellazione VLEO avrebbe aumentato invece la capacità nelle aree dove la richiesta poteva essere più elevata.

Successivamente, *SpaceX* ha fatto richiesta, ottenendo l'approvazione dalla FCC nel 2019, per variare il posizionamento di 1.584 satelliti, passando da un'altitudine di 1.150 km a un'altitudine di 550 km, ritenendo che la modifica potesse servire all'interesse pubblico, migliorando la latenza della banda larga. Le modifiche (con delle aggiunte) approvate furono le seguenti[29]:

**Tabella 3 - Programmazione 2019 (4408 satelliti)**

<i>Gruppo</i>	<i>Altezza <math>h</math></i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i>Piani orbitali</i>	<i>Satelliti per piano</i>	<i><math>n^\circ</math> Satelliti</i>
1	550 km	53°	72	22	1584
2	540 km	53.2°	72	22	1584
3	570 km	70°	36	20	720
4	560 km	97.6°	6	58	348
5	560 km	97.6°	4	43	172



Le modifiche apportate hanno come scopo quello di ridurre la latenza per i consumatori americani e accelerare l'avvio del servizio a banda larga nelle regioni polari, comprese le aree prive di alternative valide di banda larga ad alta velocità. A seguito delle prime lamentele della comunità astronomica, riguardo la luminosità dei suoi satelliti, *SpaceX* ha portato due soluzioni, che però risultano ancora lontane dalla richiesta astronomica: *DarkSat* (un dimezzamento della luminosità) e *Visor-Sat* (una riduzione del 30%). L'obiettivo minimo richiesto è di raggiungere le 7 magnitudini, per limitare il più possibile la percentuale di immagini perse dal *LSST* dell'*Osservatorio Vera C. Rubin*.

Nel 2020 *SpaceX* ha presentato un'ulteriore richiesta per ampliare la sua costellazione, utilizzando i satelliti di seconda generazione *Gen2*[30], progettando queste locazioni sulle orbite:

**Tabella 4 - Programmazione Gen2 2020 (30000 satelliti)**

<i>Altezza h</i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i>Piani orbitali</i>	<i>Satelliti per piano</i>	<i>n° Satelliti</i>
328 km	30°	1	7178	7178
334 km	40°	1	7178	7178
345 km	53°	1	7178	7178
360 km	96.9°	40	50	2000
373 km	75°	1	1998	1998
499 km	53°	1	4000	4000
604 km	148°	12	12	144
614 km	115.7°	18	18	324

Successivamente la *Gen2* venne modificata, sia nelle altezze che sulla distribuzione dei satelliti[31]:

**Tabella 5 - Programmazione Gen2 2021 (29988 satelliti)**

<i>Altezza h</i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i>Piani orbitali</i>	<i>Satelliti per piano</i>	<i>n° Satelliti</i>
340 km	53°	48	110	5280
345 km	46°	48	110	5280
350 km	38°	48	110	5280
360 km	96.9°	30	120	3600
525 km	53°	28	120	3360
530 km	43°	28	120	3360
535 km	33°	28	120	3360
604 km	148°	12	12	144
614 km	115.7°	18	18	324

### 3.2 Quantità attuali (08/2023)

Il servizio internet di *Starlink* conta attualmente più di 1.5 milioni di utenti in tutto il mondo; vediamo quindi la situazione attuale del progetto, quanti dei 42mila satelliti previsti sono in orbita (altezza, piano e inclinazione) e quanti di essi possono essere visibili.

#### First Generation (V1.0, V1.5 e VisorSat)

L'obiettivo di raggiungere la metà della costellazione LEO era *Marzo 2024*, ma è stato raggiunto nell'*Agosto 2022*; attualmente conta:

**Tabella 6 - Formazione attuale (08/2023) (3656 satelliti)**

<i>Altezza h</i>	<i>Inclinazione <math>\phi</math></i>	<i>Deorbitati/decaduti</i>	<i>n° Satelliti</i>
550 km	53°	212	1453
570 km	70°	5	403
560 km	97.6°	10	233
540 km	53.2°	70	1567

*Osservazione.* Con un rapido conto si può notare che, in alcuni casi, il numero di satelliti lanciati supera il numero di satelliti "autorizzati", questo perché è previsto un tasso di fallimento/malfunzionamento durante il raggiungimento dell'orbita di azione, il target previsto rimane quello indicato dalle quantità approvate dalla FCC.

### Second Generation (Gen2)

I primi lanci della seconda generazione di satelliti sono avvenuti a *Febbraio 2023*, e continuano tutt'ora attraverso i *V2 Mini*; dall'ultima configurazione presentata da *SpaceX*, la FCC ha autorizzato, attualmente, il lancio di 7500 satelliti, pianificati per le operazioni ad altitudini comprese tra 525 km e 535 km. *SpaceX* ha richiesto delle tolleranze orbitali di +70 km e -50 km[31]; a oggi, questa parte della costellazione comprende:

**Tabella 7 - Formazione attuale (08/2023) (974 satelliti)**

Altezza $h$	Inclinazione $\phi$	Deorbitati/decaduti	n° Satelliti
530 km	43°	3	696
559 km	43°	13	257
in fase di raggiungimento dell'orbita			21

(I dati in tempo reale sono consultabili al sito *Jonathan's Space Report*<sup>2</sup>)

### 3.3 Impatti e visibilità attuale

I satelliti che compongono le *Megacostellazioni* vengono posizionati in orbite circolari (o quasi circolari), che sono caratterizzate da un'inclinazione rispetto all'Equatore Terrestre ( $\phi_{max}$ ), e, come abbiamo visto, hanno diverse altitudini di volo ( $h$ ). La distanza quindi dal baricentro della Terra è uguale a  $R_{\oplus} + h$ , dove  $R_{\oplus} = 6371km$  rappresenta il raggio della Terra.

*Osservazione.* Dai dati riportati nelle tabelle della Parte 3.2 *Quantità attuali (08/2023)*, il valore  $h \ll R_{\oplus}$ .

Vediamo come si può stimare la quantità di satelliti *Starlink* potenzialmente visibili, per tutti i gruppi (*Gen1* e *Gen2*) considerati. Un satellite sarà visibile da tutte le regioni della Terra che si trovano in un preciso intervallo di latitudini: da  $\phi_{max}$  Nord a  $\phi_{max}$  Sud. La sua visibilità dipenderà però dall'elevazione del Sole, in quanto risulterà visibile se illuminato da esso; andiamo quindi a definire l'*angolo di elevazione* del Sole sotto l'orizzonte da cui i satelliti saranno visibili (che dipenderà

<sup>2</sup>Sito web gestito da Jonathan McDowell, un astrofisico britannico, che fornisce una vasta gamma di informazioni sulle attività spaziali, compresi lanci di razzi, missioni spaziali, orbite dei satelliti, eventi celesti e molto altro ancora. Ad esempio, sono riportati tutti i lanci di *Starlink*, i loro piani orbitali, la loro altezza, il numero di decaduti, etc... [21]

dall'altezza orbitale):

$$z_{\odot} = \arccos\left(\frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h}\right) \quad (3.1)$$

tale angolo sarà sempre maggiore o uguale a  $18^{\circ}$ , che corrisponde al crepuscolo astronomico (*astronomical twilight*), indica il periodo di tempo durante il quale il cielo è abbastanza scuro da permettere l'osservazione delle stelle più luminose e dei pianeti senza l'interferenza della luce solare diffusa nell'atmosfera.

Per poter stimare il numero di satelliti che si possono osservare da un certo punto sulla Terra, calcoliamo i rapporti delle superfici dove i satelliti volano, o delle aree in cui si trovano nel punto zenitale locale. L'area di cielo in cui i satelliti possono effettivamente volare è data da:

$$S = 4\pi(R_{\oplus} + h)^2 \sin(\phi_{max}) \quad (3.2)$$

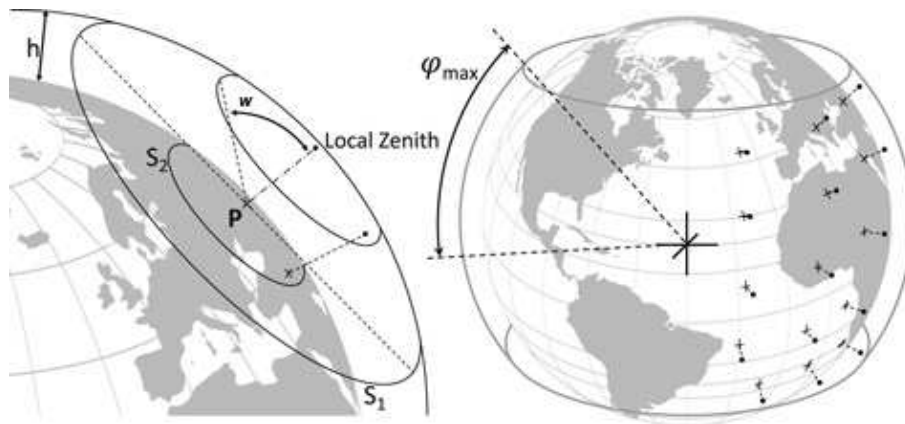


Figura 3.1: In tutto il mondo, si presume che i satelliti che orbitano a diverse altitudini  $h$ , limitati da una comune inclinazione sull'equatore di  $\phi_{max}$ , si distribuiscono su una tale superficie, con una densità data dal rapporto tra il loro numero rispetto alla superficie potenzialmente occupata. Da un certo punto  $P$  sulla Terra è possibile calcolare la quantità di satelliti sopra l'orizzonte utilizzando la superficie della cupola  $S_1$ . Tuttavia, ciascun satellite ha un punto correlato sulla Terra in cui l'oggetto è attualmente visto nel zenit locale. Una volta identificato, il calcolo della regione sulla Terra in cui i satelliti sono osservati ad un'elevazione superiore a  $90^{\circ} - w$  offre un metodo computazionale alternativo in modo che il loro numero possa essere stimato utilizzando la superficie della cupola  $S_2$ . [32]

Dato un punto P sulla Terra (un osservatore o un osservatorio) all'interno dell'intervallo definito prima da  $\phi_{max}$ , l'area della sfera orbitale in cui possono trovarsi i satelliti osservabili in un dato momento, equivale alla superficie della calotta data da:

$$S_1 = 2\pi(R_{\oplus} + h)h \quad (3.3)$$

A questo punto, conoscendo il numero di satelliti  $N$  ad una specifica altezza orbitale, possiamo determinare il numero di satelliti potenzialmente visibili dall'osservatore P attraverso il rapporto tra queste superfici ( $\eta_1 = \frac{S_1}{S}$ ):

$$n_1 = N \frac{S_1}{S} = N \eta_1 = N \frac{1}{2 \sin(\phi_{max})} \frac{h}{R_{\oplus} + h} \approx N \frac{h}{2 \sin(\phi_{max}) R_{\oplus}} \quad (3.4)$$

dove  $R_{\oplus} + h$  è stato sostituito con  $R_{\oplus}$  poiché  $h \ll R_{\oplus}$ .

I valori calcolati sono riportati nella **Tabella 8**, che riporta i dati odierni di satelliti in orbita attorno a noi.

**Tabella 8**

GENERAZIONE	$h$ [km]	$N$	$\phi_{max}$	$\eta_1$	$n_1$	$z_{\odot}$
1	550	1453	53°	4,98%	72	22° 59'
1	570	403	70°	4,37%	18	23° 22'
1	560	233	97.6°	4,08%	9	23° 11'
1	540	1567	53.2°	4,88%	76	22° 47'
2	530	696	43°	5,63%	39	22° 36'
2	559	257	43°	5,91%	15	23° 10'

**Nota:** Tutti i valori di  $z_{\odot}$  per i satelliti si trovano più in alto di 18° e quindi una parte significativa di essi sarà ancora illuminata dal Sole all'inizio e alla fine della notte astronomica. I valori tabulati si riferiscono solo ai satelliti *Starlink* considerati in questo contesto, aggiornabili di settimana in settimana attraverso il sito di Jonathan McDowell, Jonathan's Space Report.[21]

I dati nella **Tabella 8** mostrano che da un qualsiasi punto P sulla Terra (all'interno dell'intervallo delimitato dall'inclinazione orbitale  $\phi_{max}$ ) il numero di satelliti sopra l'orizzonte che possono essere visti è circa il 5% dei satelliti dell'intera costellazione (ovvero  $\approx 230$  satelliti).

Un metodo alternativo, ma più pratico, consiste nel limitarci a considerare i satelliti all'interno di un certo angolo  $w$  dallo zenit; come è logico aspettarsi, la maggior parte dei satelliti occuperà le zone più vicine all'orizzonte[33], lontano dalla calotta sopra all'osservatore P. Utilizzando il concetto della superficie dell'area sulla Terra in cui si trovano i punti il cui zenit locale è attraversato da un satellite ( $S_2$ ), e attraverso la formula di  $S$ , vista in precedenza, sostituendo  $R_{\oplus} + h$  con  $R_{\oplus}$  ci calcoliamo l'area superficiale corrispondente sulla Terra da cui un satellite potrebbe apparire allo zenit locale:

$$S = 4\pi R_{\oplus}^2 \sin(\phi_{max}) \quad (3.5)$$

Andiamo quindi a stimarci tale numero  $n_2$ , per diversi valori di  $w$ , attraverso il rapporto tra queste aree ( $\eta_2 = \frac{S_2}{S}$ ):

$$n_2 = N\eta_2 = N\frac{S_2}{S} \approx N\frac{h^2 \tan^2(w)}{2\pi \sin(\phi_{max})R_{\oplus}} \quad (3.6)$$

I valori calcolati sono riportati nella **Tabella 9** che riporta i dati odierni di satelliti in orbita attorno a noi. Tali dati mostrano che, aumentando  $w$  e quindi avvicinandoci all'orizzonte, il numero di satelliti aumenta; viceversa avvicinandoci allo zenit, il numero di satelliti diminuisce.

Tabella 9

GENERAZIONE	$h$ [km]	$N$	$\phi_{max}$	$w$	$\eta_2$	$n_2$
1	550	1453	53°	30°	0,16%	2
				50°	0,66%	10
				70°	3,52%	51
1	570	403	70°	30°	0,14%	1
				50°	0,60%	2
				70°	3,22%	13
1	560	233	97.6°	30°	0,13%	0
				50°	0,55%	1
				70°	2,94%	7
1	540	1567	53.2°	30°	0,15%	2
				50°	0,64%	10
				70°	3,39%	53
2	530	696	43°	30°	0,17%	1
				50°	0,72%	5
				70°	3,83%	27
2	559	257	43°	30°	0,19%	0
				50°	0,80%	2
				70°	4,26%	11

**Nota:** Il numero  $n_2$  di satelliti ancora illuminati prima dell'alba e poco dopo il tramonto, si riferisce agli attuali dati considerati. Il numero  $w$  dipende dall'indice di "airmass", cioè il percorso attraverso cui la luce di un oggetto celeste viaggia attraverso l'atmosfera terrestre prima di raggiungere un osservatore sulla superficie della Terra, a 60° ho un airmass pari a 2, a 70° l'indice è quasi 3, considerato un valore limite, oltre il quale l'airmass inizia ad avere un impatto significativo sulla qualità delle osservazioni, riducendo la nitidezza degli oggetti osservati.[32]

I due metodi ci forniscono una visione di completezza (il primo) della situazione da un punto P sulla Terra e una visione più localizzata (il secondo) ad angolazioni precise.

## 3.4 Conclusioni

Seguendo quindi il modello di calcolo presentato dall'astronomo *Roberto Ragazzoni*[32], in questo studio è stata presentata una valutazione molto semplice l'impatto dei satelliti a bassa altitudine della *Megacostellazione Starlink* (attualmente di 4.630 satelliti su 42.000 previsti) sulle osservazioni astronomiche. Attraverso i dati attuali, possiamo ricavare che circa 230 satelliti della Megacostellazione odierna (5%) risultano visibili; visti i numeri previsti per il singolo progetto *Starlink* sarà importante tenere controllato i valori percentuali  $\eta_1$  e  $\eta_2$ . Attraverso i numeri previsti di satelliti che formeranno l'intera Megacostellazione (circa 42.000 satelliti), il 4.20% risulterà visibile prima dell'alba e poco dopo il tramonto (**Tabella 10** e **Tabella 11**).

Uno studio condotto dagli Astronomi *Olivier R. Hainaut* e *Andrew P. Williams* (non solo col progetto *Starlink*), ha riportato, attraverso simulazioni future (definite da loro, "alquanto pessimistiche") che circa il 30% delle esposizioni potrebbe essere compromesso all'inizio e alla fine della notte, con un picco del 50% durante il crepuscolo astronomico (in riferimento all'*Osservatorio Vera C. Rubin*)[34].

*Starlink* non è l'unico progetto di Megacostellazione previsto; a concorrere ci sono:

- il progetto *Kuiper* (circa 3.200 satelliti) di *Amazon*;
- il progetto di *OneWeb* (circa 650 satelliti);
- il progetto di *Astra* (circa 13600 satelliti);
- il progetto di *Boeing* (circa 150 satelliti);
- il progetto *Orchestra* (circa 200 satelliti) di *Inmarsat*;
- il progetto *HVNET* (circa 1400 satelliti) di *Hughes Network Systems*.

In aggiunta ai progetti di altre società/agenzie, sono stati stimati circa 400.000 satelliti nella LEO.

Dal lancio del primo satellite artificiale (*Sputnik*), il 4 ottobre 1957, da parte dell'Unione Sovietica, il numero di satelliti in orbita attorno a noi si è moltiplicato sempre di più, raggiungendo un picco dall'arrivo di *SpaceX*; i dati attuali ci mostrano che circa il 42% dei satelliti in orbita appartengono al progetto *Starlink*. Il team dell'*Osservatorio Rubin* si è messo in stretta collaborazione con gli ingegneri di *SpaceX*, per cercare dei metodi efficaci ed efficienti per ridurre l'impatto delle strisce dei satelliti. Tali soluzioni, qualora venissero trovate, potranno essere adottate, con le dovute modifiche, ad altri progetti di Megacostellazioni.



Tabella 10

$h$ [km]	$N$	$\phi_{max}$	$\eta_1$	$n_1$	$w$	$\eta_2$	$n_2$	$z_{\odot}$
550	1584	53°	4,98%	79	30°	0,16%	2	22°59'
					50°	0,66%	10	
					70°	3,52%	56	
570	720	70°	4,37%	31	30°	0,14%	1	23°22'
					50°	0,60%	4	
					70°	3,22%	23	
560	520	97,6°	4,08%	21	30°	0,13%	1	23°11'
					50°	0,55%	3	
					70°	2,94%	15	
540	1584	53,2°	4,88%	77	30°	0,15%	2	22°47'
					50°	0,64%	10	
					70°	3,39%	54	
345,6	2547	53°	3,22%	82	30°	0,06%	2	18°27'
					50°	0,26%	7	
					70°	1,39%	35	
340,8	2478	48°	3,42%	85	30°	0,06%	2	18°20'
					50°	0,27%	7	
					70°	1,45%	36	
335,9	2493	42°	3,74%	93	30°	0,07%	2	18°12'
					50°	0,30%	7	
					70°	1,57%	39	

**Nota:** le quantità elencate fanno riferimento ai dati del progetto completo della Gen1 (11926 satelliti)

Tabella 11

$h$ [km]	$N$	$\Phi_{max}$	$\eta_1$	$n_1$	$w$	$\eta_2$	$n_2$	$z_{\odot}$
340	5280	53°	3,17%	167	30°	0,06%	3	18°18'
					50°	0,25%	13	
					70°	1,35%	71	
345	5280	46°	3,57%	189	30°	0,07%	4	18°26'
					50°	0,29%	15	
					70°	1,54%	81	
350	5280	38°	4,23%	223	30°	0,08%	4	18°34'
					50°	0,35%	18	
					70°	1,85%	98	
360	3600	96,9°	2,69%	97	30°	0,05%	2	18°49'
					50°	0,23%	8	
					70°	1,21%	44	
525	3360	53°	4,77%	160	30°	0,14%	5	22°30'
					50°	0,60%	20	
					70°	3,21%	108	
530	3360	43°	5,63%	189	30°	0,17%	6	22°36'
					50°	0,72%	24	
					70°	3,83%	129	
535	3360	33°	7,11%	239	30°	0,22%	7	22°42'
					50°	0,92%	31	
					70°	4,89%	164	
604	144	148°	8,17%	12	30°	0,28%	0	24°11'
					50°	1,20%	2	
					70°	6,40%	9	
614	324	115,7°	4,88%	16	30°	0,17%	1	24°12'
					50°	0,73%	2	
					70°	3,89%	13	

**Nota:** le quantità elencate fanno riferimento ai dati del progetto completo della Gen2 (29988 satelliti).

# Bibliografia

- [1] Associazione AstronomiAmo. *Introduzione alla sfera celeste e al movimento dei corpi*. URL: <https://www.astronomiamo.it/DivulgazioneAstronomica/Appunti-di-astronomia>.
- [2] Wikipedia. *Osservatorio Vera C. Rubin*. URL: [https://it.frwiki.wiki/wiki/Observatoire%5C\\_Vera-C.-Rubin%5C#Caract%C3%A9ristiques%5C\\_techniques](https://it.frwiki.wiki/wiki/Observatoire%5C_Vera-C.-Rubin%5C#Caract%C3%A9ristiques%5C_techniques).
- [3] Wikipedia. *Astronomia Ottica*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Astronomia%5C\\_ottica](https://it.wikipedia.org/wiki/Astronomia%5C_ottica).
- [4] Wikipedia. *Telescopio Ottico*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio%5C\\_ottico](https://it.wikipedia.org/wiki/Telescopio%5C_ottico).
- [5] wau Paola Pala. *Legge delle lenti sottili per TOLC-MED e TOLC-VET*. URL: <https://wauniversity.it/legge-lenti-sottili/>.
- [6] *L'Amaldi 2.0*. Vol. 17 - La luce. Zanichelli, 2010.
- [7] *Ottica adattiva*. URL: <http://www.alessiopisani.com/>.
- [8] Wikipedia. *Ottica attiva*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Ottica%5C\\_attiva](https://it.wikipedia.org/wiki/Ottica%5C_attiva).
- [9] Wikipedia. *Ottica adattiva*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Ottica%5C\\_adattiva](https://it.wikipedia.org/wiki/Ottica%5C_adattiva).
- [10] Vera C. Rubin Observatory. *Science Goals*. URL: <https://rubinobservatory.org/explore/science-goals>.
- [11] Vera C. Rubin Observatory. *Impact of Satellite Constellations*. URL: <https://www.lsst.org/content/lsst-statement-regarding-increased-deployment-satellite-constellations#>.
- [12] NOIRLab. *Vera C. Rubin Observatory*. URL: <https://noirlab.edu/science/programs/vera-c-rubin-observatory>.

- [13] Wikipedia. *Satellite artificiale*. URL: [https://it.wikipedia.org/wiki/Satellite%5C\\_artificiale](https://it.wikipedia.org/wiki/Satellite%5C_artificiale).
- [14] *L'Amaldi 2.0*. Vol. 11 - Le forze e il movimento. Zanichelli, 2010.
- [15] Wikipedia. *SpaceX*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX>.
- [16] Tereza Pultarova e Elizabeth Howell. «Starlink satellites: Everything you need to know about the controversial internet megaconstellation». In: *Space.com* (2022).
- [17] Wikipedia. *Starlink*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>.
- [18] nextBIG future - Brian Wang. *SpaceX Starlink Version 2 Mini Will Have 4X Version 1.5 Capacity*. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2023/02/spacex-starlink-version-2-mini-will-have-4x-version-1-5-capacity.html>.
- [19] EVERYDAY ASTRONAUT - Trevor Sesnic. *Starlink Group 2-10 — Falcon 9 Block 5*. URL: <https://everydayastronaut.com/starlink-group-2-10-falcon-9-block-5/>.
- [20] IAU. *Satellite Constellations*. URL: <https://www.iau.org/public/themes/satellite-constellations/%5C#faq>.
- [21] Jonathan C. McDowell. *Jonathan's Space Report*. URL: <https://planet4589.org/index.html>.
- [22] J Tregloan-Reed et al. «First observations and magnitude measurement of Starlink's Darksat». In: *Astronomy & Astrophysics* (2020).
- [23] TS2. *L'impatto ambientale della rete satellitare di Starlink*. URL: <https://ts2.space/it/limpatto-ambientale-della-rete-satellitare-di-starlink/>.
- [24] Stefano Gallozzi. *Gli Astronomi e la Sindrome dello Struzzo*. URL: <https://cielobuio.org/gli-astronomi-e-la-sindrome-dello-struzzo/>.
- [25] Patrizia Caraveo. *Saving the Starry Night: Light Pollution and Its Effects on Science, Culture and Nature*. Springer, 2021.
- [26] Stefano Gallozzi. «Le nuove Costellazioni Satellitari sono un pericolo per tutti noi (non solo per gli astronomi)». In: (2021).
- [27] Luigi R. Bedin. «Le nuove costellazioni nel cielo sono una cosa molto MOLTO positiva per tutti!» In: (2021).

- [28] FCC. *Report 2017, SAT-LOA-20170301-00027*. URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20170301-00027/1190018.pdf>.
- [29] FCC. *Report 2020a, SAT-MOD-20200417-00037*. URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20200417-00037/2274315.pdf>.
- [30] FCC. *Report 2020b, SAT-LOA-20200526-00055*. URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20200526-00055/2378669.pdf>.
- [31] FCC. *Technical Attach*. URL: [https://licensing.fcc.gov/myibfs/download.do?attachment%5C\\_key=12943362](https://licensing.fcc.gov/myibfs/download.do?attachment%5C_key=12943362).
- [32] Roberto Ragazzoni. «The surface brightness of megaconstellation satellite trails on large telescopes». In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (2020).
- [33] CG Bassa, OR Hainaut e D Galadí-Enríquez. «Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations». In: *Astronomy & Astrophysics* (2022).
- [34] Olivier R Hainaut e Andrew P Williams. «Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains». In: *Astronomy & Astrophysics* (2020).

