

Dall'Osservazione dei Satelliti Artificiali alla Scoperta delle Leggi di Keplero

Lucia Dragotto, Istituto Comprensivo "S. Teodoro" di Genova

Alessandro Iscra, Liceo Scientifico Statale "E. Fermi" di Genova

Maria Serra, Liceo Statale "Alfano I" di Salerno

Introduzione

L'astronomia e l'astrofisica appassionano molto i giovani studenti; al tema sono dedicati innumerevoli materiali cartacei e multimediali reperibili facilmente e gratuitamente tramite il web. Questo opuscolo propone un approccio ai moti orbitali, di livello concepito per gli studenti della scuola secondaria di primo grado, che si basa sull'osservazione ad occhio nudo dei satelliti artificiali. L'approccio in questo caso è molto semplice, ma le esperienze proposte possono stimolare gli insegnanti a sviluppare il tema in modo molto più approfondito, applicando all'osservazione dei satelliti artificiali le ben note metodiche che hanno usato i più famosi ed illustri fisici del passato per dedurre le leggi di Keplero osservando il moto dei pianeti intorno al Sole.

I satelliti artificiali

Osserviamo i satelliti artificiali



In una serata in cui il cielo è sereno e si vedono bene le stelle, guarda in alto con attenzione, per almeno 15 minuti, probabilmente vedrai qualche puntino che si muove. La maggior parte di questi oggetti in movimento sono aeroplani, la cui luce è emessa da lampadine bianche e colorate (una rossa sull'ala sinistra, una verde sull'ala destra), ma -se osservi ancora più attentamente il cielo-, noterai alcuni puntini bianchi in movimento, che non assomigliano agli aerei perché:

-è puntino come una stella, senza luci colorate o lampeggianti;

-sembrano più veloci degli aerei;

-non fanno alcun rumore.

Di che cosa si tratta? Sono i satelliti artificiali.

Che cosa sono i satelliti artificiali?

Un satellite è un oggetto che ruota intorno ad un pianeta. La Terra ha un solo satellite naturale: la Luna, ma grazie al progresso tecnologico, l'uomo è capace a costruire ed a fare ruotare intorno alla Terra degli oggetti costruiti da lui: sono i satelliti artificiali. Il primo satellite artificiale che l'uomo ha lanciato nello spazio è stato lo Sputnik, nel 1957. Da allora sono stati messi in orbita migliaia di satelliti, molti dei quali dopo alcuni mesi o anni sono ricaduti sulla Terra disintegrandosi nell'atmosfera prima di toccare il suolo.

A che cosa servono i satelliti artificiali?

I satelliti artificiali hanno diversi scopi:

-osservare costantemente la Terra, per tenere aggiornate le mappe, soprattutto quelle online (come Google Maps);

-effettuare osservazioni delle nubi, per permettere di ottenere previsioni meteorologiche sempre più precise;

-effettuare importanti misure sul livello del mare, rilevando quasi immediatamente pericolosi tsunami, misurare la temperatura delle acque e dei terreni, rilevare incendi (telemetria);

-ripetere segnali radio trasmessi da Terra a territori molto lontani, consentendo di effettuare le telecomunicazioni via satellite.

Inoltre, 24 satelliti formano la *costellazione Global Positioning System* (GPS) e trasmettono segnali radio ai ricevitori a terra e sugli aerei, che consentono così una precisissima localizzazione geografica. Oggi quasi tutti gli smartphone posseggono questi ricevitori.

Perché alcuni satelliti artificiali si possono vedere?

Un satellite artificiale non ha lampadine: alle quote a cui vola non ha bisogno di farsi vedere da nessuno; non ha piloti a bordo che possono cambiare la sua rotta. Quando sulla Terra tramonta il sole, per alcune ore i satelliti sono ancora bene illuminati: noi vediamo il cielo scuro, scorgiamo le stelle, ma i satelliti sono colpiti e riflettono la luce solare. Per questo motivo, se il satellite è sufficientemente grande, si rende visibile perché riflette la luce del sole, così come fa la Luna. E' possibile vedere i satelliti artificiali da mezz'ora fino ad alcune ore dopo il tramonto, e da alcune ore fino a mezz'ora prima dell'alba.

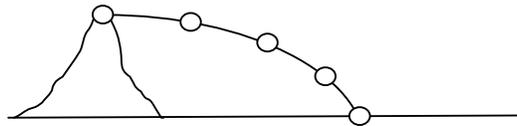
Come osservare i satelliti artificiali

E' possibile prevedere quando osservare un satellite? Esistono numerose applicazioni che permettono di predire la posizione dei satelliti e di stabilire quando questi saranno visibili.

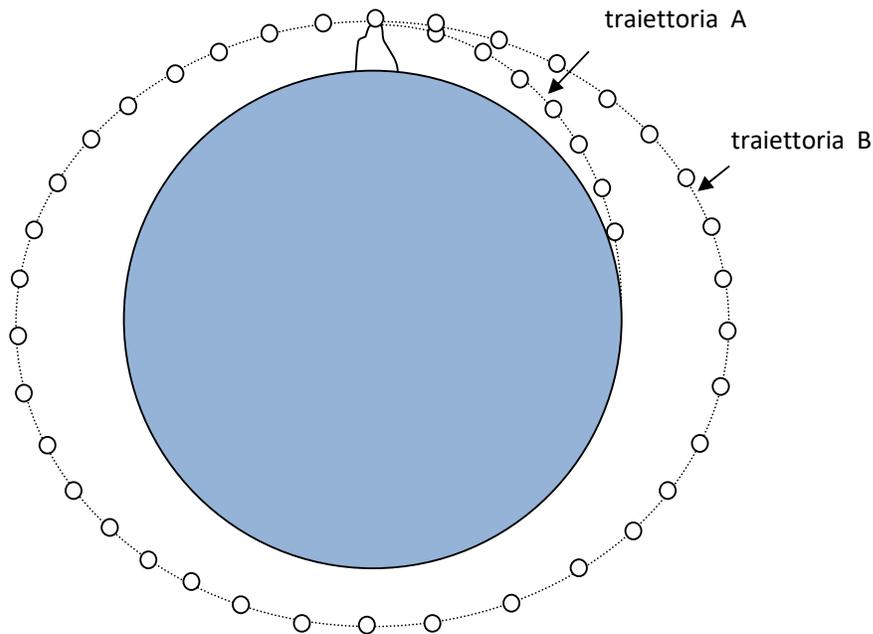
Supponiamo di avere a disposizione una di queste applicazioni, la prima domanda che ci poniamo è quali sono i satelliti visibili. Anche se le applicazioni suddividono i satelliti per categorie, fra cui c'è l'insieme dei satelliti più luminosi (brightest) che è quello che ci interessa, iniziamo a cercare di osservare il satellite più importante e grande che l'uomo ha costruito: la Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, ISS). Grande come un campo di calcio e permanentemente abitata da astronauti, la ISS vola in orbita ad una quota di circa 400 km rispetto al livello del mare. Dal tramonto a due o tre ore dopo e da due o tre ore prima dell'alba fino all'alba, la ISS quando passa sopra di noi è visibilissima; molte applicazioni e siti online permettono di predirne i passaggi. E' sufficiente cercare tramite un motore di ricerca *ISS visibile dalla Terra* oppure, *ISS visible passes* per accedere a pagine interattive che, dopo avere inserito la nostra posizione (città o comune in cui viviamo), ci forniscono un *calendario* dei passaggi, ciascuno dei quali ha una durata compresa fra qualche minuto fino a circa dieci minuti. Un sito particolarmente interessante è <http://n2yo.com> che permette di predire i passaggi di quasi tutti i satelliti in orbita ed ha impostato come satellite predefinito la ISS. Se è possibile osservare la posizione del satellite mentre è in vista, può stupire constatare fino a quale distanza questo è visibile (dall'Italia si vede benissimo la ISS ad occhio nudo mentre sta sorvolando la Gran Bretagna, la Spagna ed il Mar Nero).

Il moto orbitale

Perché un satellite può ruotare intorno alla Terra senza mai cadere? Probabilmente avrai già avuto la risposta a questa domanda quando ti sei chiesto come mai la Luna non cade sulla Terra e la Terra insieme a tutti i pianeti del sistema solare non cadono sul Sole. Comunque ti riproponiamo volentieri questa spiegazione: immagina di lanciare un sasso orizzontalmente da una collinetta verso un campo pianeggiante. Il sasso inizialmente ha una velocità orizzontale, ma la terra incomincia ad attirarlo verticalmente verso il campo, quindi alla componente della velocità orizzontale si aggiunge una componente verticale che aumenta sempre di più. La traiettoria del sasso diventa una curva e, più precisamente una parabola; dopo poco tempo il sasso cade al suolo.



La traiettoria del sasso assomiglia a quella di un pallone durante una partita di calcio. Il campo è una superficie piana orizzontale, perché la vediamo da un'altitudine molto piccola rispetto al raggio della Terra. Che cosa succederebbe al sasso se venisse lanciato da un'altitudine così elevata da dover considerare la Terra con la sua curvatura?



Se il sasso viene lanciato con una velocità non troppo elevata, compie una traiettoria che non è più parabolica, poiché man mano che il sasso si sposta, la posizione della Terra cambia, la traiettoria potrebbe essere come la A, ma se il sasso venisse lanciato con una velocità maggiore, la sua traiettoria potrebbe essere tale da non farlo mai ricadere sulla Terra (traiettoria B). In questo caso il sasso potrebbe assumere una traiettoria, denominata orbita, che sarebbe percorsa dal sasso in modo perpetuo, senza bisogno di motori, *si tratterebbe di una caduta libera eterna*. Il sasso potrebbe essere lanciato anche in modo tale da non ritornare mai più sul punto da cui è stato lanciato. Si dice che ha percorso un'orbita aperta.

Un lancio dalla vetta del Monte Everest

La cima del Monte Everest è la più alta del mondo: lanciando un sasso da quella cima, potrebbe entrare in orbita? Un moto orbitale è possibile se non ci sono forze frenanti. Alla quota del Monte Everest c'è ancora l'atmosfera terrestre e l'aria impedirebbe il moto perpetuo del satellite; a quale altitudine l'atmosfera terrestre scompare? In realtà con l'aumentare dell'altitudine, la densità dell'atmosfera diventa sempre più piccola, senza mai annullarsi, ma al disopra dei 300 km rispetto al livello del mare, la forza frenante dell'aria è quasi trascurabile e permette ai satelliti di volare in orbita, tuttavia una piccola forza frenante esiste e l'orbita diventa una sorta spirale che avvicina sempre più il satellite alla Terra, fino allo schianto. Se si vuole evitare questo, piccoli motori a razzo con aria compressa compensano le perdite di quota causate dall'attrito con l'atmosfera.

La forma delle orbite chiuse



Scarica un'applicazione per il tracking di satelliti, questa operazione può risultare difficile, poiché in questo opuscolo non c'è lo spazio per poterti guidare, in quanto le applicazioni si aggiornano con molta frequenza; inoltre vincoli di copyright non permettono di creare in queste pagine un manuale di istruzioni per l'installazione di un'applicazione che richiederebbe la pubblicazione di immagini protette. Ti consigliamo di installare l'applicazione Orbitron, che richiede un personal computer con il sistema operativo Windows, seguendo le seguenti istruzioni:

-accedi al sito www.stoff.pl del creatore dell'applicazione Sebastian Stoff;

-scarica l'applicazione Orbitron seguendo le istruzioni. E' importantissimo che l'installazione avvenga in una cartella non protetta dai diritti di amministratore, pertanto ti suggeriamo di installarla nella cartella Documenti, anche se questo può sembrare inusuale;

-durante l'installazione ti verrà chiesto se desideri installare anche un nuovo salvaschermo. Ti raccomandiamo di rispondere NO;

-nella scelta della lingua, l'inglese è preferibile, ma scegli pure l'italiano, accettando qualche errore di sintassi e di grammatica nelle frasi tradotte;

-avvia l'applicazione. Nel menù in basso clicca su "Localione" e cerca la città in cui abiti oppure quella a te più vicina, quindi assicurati di effettuare la scelta verificando che sul planisfero la crocetta sia posizionata sulla zona dell'Italia in cui abiti (se non visualizzi il planisfero, vai su "Visualizzazione" e clicca sul pulsante "Mappamondo");

-a destra dello schermo clicca su "scegli" e ti appare una lista di file, ognuno dei quali contiene i parametri orbitali di un gruppo di satelliti, scegli il file "visual";

-se ti compare il messaggio che i dati sono scaduti, con il computer collegato alla rete, segui la procedura per aggiornare i file: ti comparirà di nuovo un elenco sotto forma di link, dovrai cercare di nuovo "visual" e fare doppio click sul link, a questo punto il file è aggiornato;

-da questo momento hai in mano un'applicazione molto completa, che potrai approfondire da solo, noi ti guidiamo per scoprire che forma hanno le orbite dei satelliti;

-in alto a destra trovi un elenco di satelliti, cerca la ISS (Stazione Spaziale Internazionale) e selezionala;

-clicca su "dati": ti appaiono molti dati interessanti: con i tuoi insegnanti potrai approfondire molte cose (quanto il satellite dista da te, la sua velocità, ecc, ma adesso ti devi concentrare su: l'altitudine, Alt (km), l'anomalia vera, TA e l'ora indicata dall'orologio;

-dal menù in basso seleziona "principale" e passa in modalità simulazione; in questo modo puoi scegliere data, ora e fare avanzare l'orologio manualmente.

Rileviamo la forma delle orbite

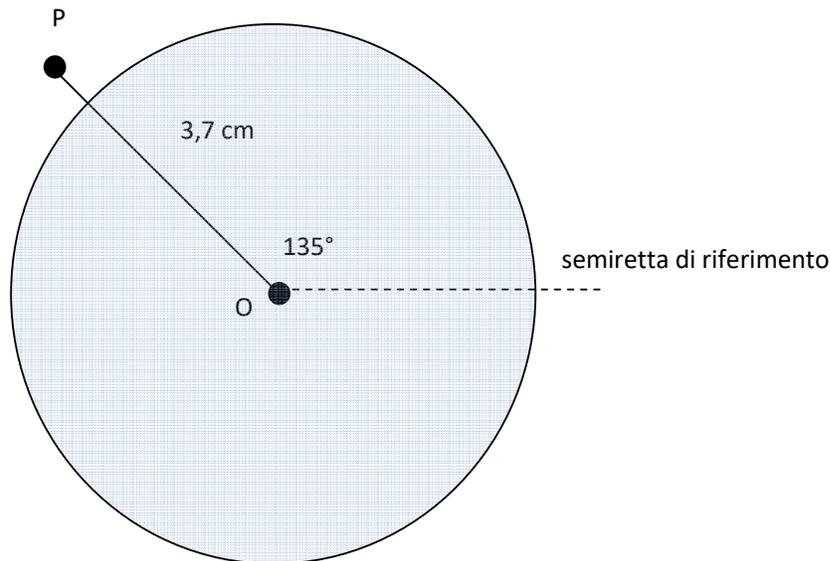
Molte applicazioni di tracking dei satelliti permettono di ricavare l'altitudine del satellite e l'anomalia vera (true anomaly). Questi due dati permettono di disegnare la posizione del satellite su un foglio, in questo modo: preso come riferimento il centro della Terra (punto O), sapendo che il raggio terrestre medio è 6370 km:

-somma all'altitudine del satellite il raggio della Terra e così determini la distanza d del satellite dal centro O;

-usa il goniometro e, rispetto ad una semiretta di riferimento, individua l'angolo α , in senso antiorario, indicato dall'anomalia vera;

-traccia il punto P sulla semiretta che forma l'angolo α rispetto a quella di riferimento e che dista d da O. Ovviamente per rappresentare sulla carta la distanza, ti serve definire una scala. Se usi la carta millimetrata ti consigliamo di impostare 1 cm corrispondente a 2000 km.

La figura mostra come posizionare il satellite se l'altitudine valesse 1000 km e l'anomalia vera 135° : sommando la lunghezza del raggio terrestre all'altitudine si ottiene una distanza dal centro della Terra $d = 7370$ km con un angolo $\alpha = 135^\circ$. Considerano una scala di 1 cm / 2000 km, dividendo 7370 km per 2000 km/cm si ottiene che il punto dista dal centro $7370:2000 = 3,685$ cm approssimabile a 3,7 cm.



Tracciamo l'orbita della Stazione Spaziale Internazionale

Utilizzando l'applicazione di Tracking Orbitron abbiamo rilevato i dati relativi ad un'orbita completa, da una data ed ora in cui l'anomalia vera valeva 0° a quando questa è ritornata a 0° , rilevando i dati ogni 15° di anomalia, ottenendo la seguente tabella:

giorno	ora [ore:min:sec]	altitudine [km]	anomalia vera [gradi]
03/09/'19	13:00:19	411	0
03/09/'19	13:04:04	410	15
03/09/'19	13:08:04	411	30
03/09/'19	13:11:49	413	45
03/09/'19	13:15:34	416	60
03/09/'19	13:19:34	419	75
03/09/'19	13:23:19	421	90
03/09/'19	13:27:19	423	105
03/09/'19	13:31:04	423	120
03/09/'19	13:35:04	422	135
03/09/'19	13:38:49	421	150
03/09/'19	13:42:49	421	165
03/09/'19	13:46:34	422	180
03/09/'19	13:30:34	424	195
03/09/'19	13:54:19	426	210
03/09/'19	13:58:19	429	225
03/09/'19	14:02:04	432	240
03/09/'19	14:06:04	433	255
03/09/'19	14:09:49	433	270
03/09/'19	14:13:49	431	285
03/09/'19	14:17:34	427	300
03/09/'19	14:21:34	422	315
03/09/'19	14:25:18	418	330
03/09/'19	14:29:18	413	345
03/09/'19	14:33:03	411	360

I dati rilevati sono rielaborati per ottenere il tempo trascorso dall'inizio (cioè dalle ore 13:00:19 del 3 settembre 2019), la distanza dal centro della Terra (ottenuta sommando il raggio della Terra all'altitudine), la distanza in cm del punto dal centro, ottenuta dividendo la distanza del centro della Terra per 2000 km/cm ed approssimandola al millimetro.

tempo [s]	distanza [km]	distanza_punto [cm]	anomalia vera [gradi]
0	6781	3,4	0
225	6780	3,4	15
465	6781	3,4	30
690	6783	3,4	45
915	6786	3,4	60
1155	6789	3,4	75
1380	6791	3,4	90
1620	6793	3,4	105
1845	6793	3,4	120
2085	6792	3,4	135
2310	6791	3,4	150
2550	6791	3,4	165
2775	6792	3,4	180
3015	6794	3,4	195
3240	6796	3,4	210
3480	6799	3,4	225
3705	6802	3,4	240
3945	6803	3,4	255
4170	6803	3,4	270
4410	6801	3,4	285
4635	6797	3,4	300
4875	6792	3,4	315
5099	6788	3,4	330
5339	6783	3,4	345
5564	6781	3,4	360

dalla tabella si può osservare che la distanza dal centro della Terra è quasi costante: i valori variano fra 6780 km e 6803 km; poiché le applicazioni di tracking sono molto precise e considerano sia che la Terra non è perfettamente sferica, sia, alcune volte, i rilievi montuosi, queste variazioni di distanza possono essere trascurate per concludere che l'orbita della Stazione Spaziale Internazionale sembra una circonferenza: si osserva che la distanza da considerare nel disegno, approssimata al millimetro, è costante.

Siccome la tabella riporta anche il tempo, si deduce facilmente che il tempo impiegato dalla Stazione Spaziale Internazionale per compiere un giro completo intorno alla Terra (periodo di rivoluzione) vale 5564 s, cioè 92 minuti e 44 secondi. La traccia dell'orbita è riportata su un foglio di carta millimetrata; per motivi che saranno spiegati nel prossimo paragrafo, su ogni punto tracciato è riportato l'istante di tempo corrispondente.

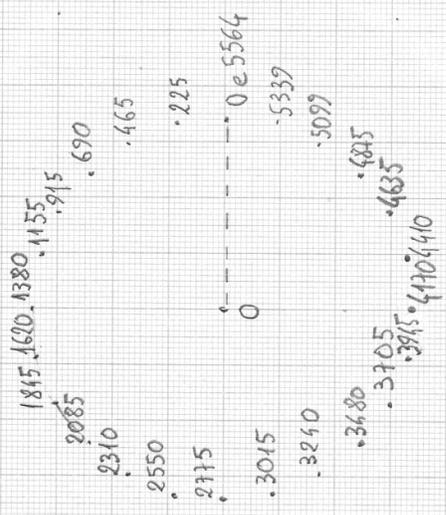
Tracciamo l'orbita di un satellite Molniya

C'è un insieme di satelliti, i Molniya, la cui forma dell'orbita è per noi molto interessante. Scegliamo, ad esempio, il satellite Molniya 1-40; ciò è facile tramite l'applicazione Orbitron, scegliendo il file "molniya" da "Carica lista" ed effettuando l'aggiornamento, se è richiesto. Alle ore 10:29:19 del 3 settembre 2019, l'anomalia vera vale 0° e possiamo partire con il rilievo della tabella seguente:

giorno	ora [ore:min:sec]	altitudine [km]	anomalia vera [gradi]
03/09/'19	10:29:19	1491	0
03/09/'19	10:32:49	1595	15
03/09/'19	10:36:49	1940	30
03/09/'19	10:41:18	2568	45
03/09/'19	10:46:33	3527	60
03/09/'19	10:53:18	4964	75
03/09/'19	11:02:18	7018	90
03/09/'19	11:15:18	9981	105
03/09/'19	11:35:33	14271	120
03/09/'19	12:08:48	20293	135
03/09/'19	13:04:03	27928	150
03/09/'19	14:32:03	35519	165
03/09/'19	16:28:18	38917	180
03/09/'19	18:24:48	35500	195
03/09/'19	19:52:33	27920	210
03/09/'19	20:47:48	20283	225
03/09/'19	21:21:03	14261	240
03/09/'19	21:41:18	9972	255
03/09/'19	21:54:18	7011	270
03/09/'19	22:03:33	4903	285
03/09/'19	22:10:03	3524	300
03/09/'19	22:15:18	2567	315
03/09/'19	22:19:48	1940	330
03/09/'19	22:23:48	1595	345
03/09/'19	22:27:18	1491	360

Anche in questo caso i dati rilevati sono rielaborati per ottenere il tempo trascorso dall'inizio (cioè dalle ore 10:29:19 del 3 settembre 2019), la distanza dal centro della Terra (ottenuta sommando il raggio della Terra all'altitudine), la distanza in cm del punto dal centro, ottenuta dividendo la distanza del centro della Terra per 2000 km/cm ed approssimandola al millimetro.

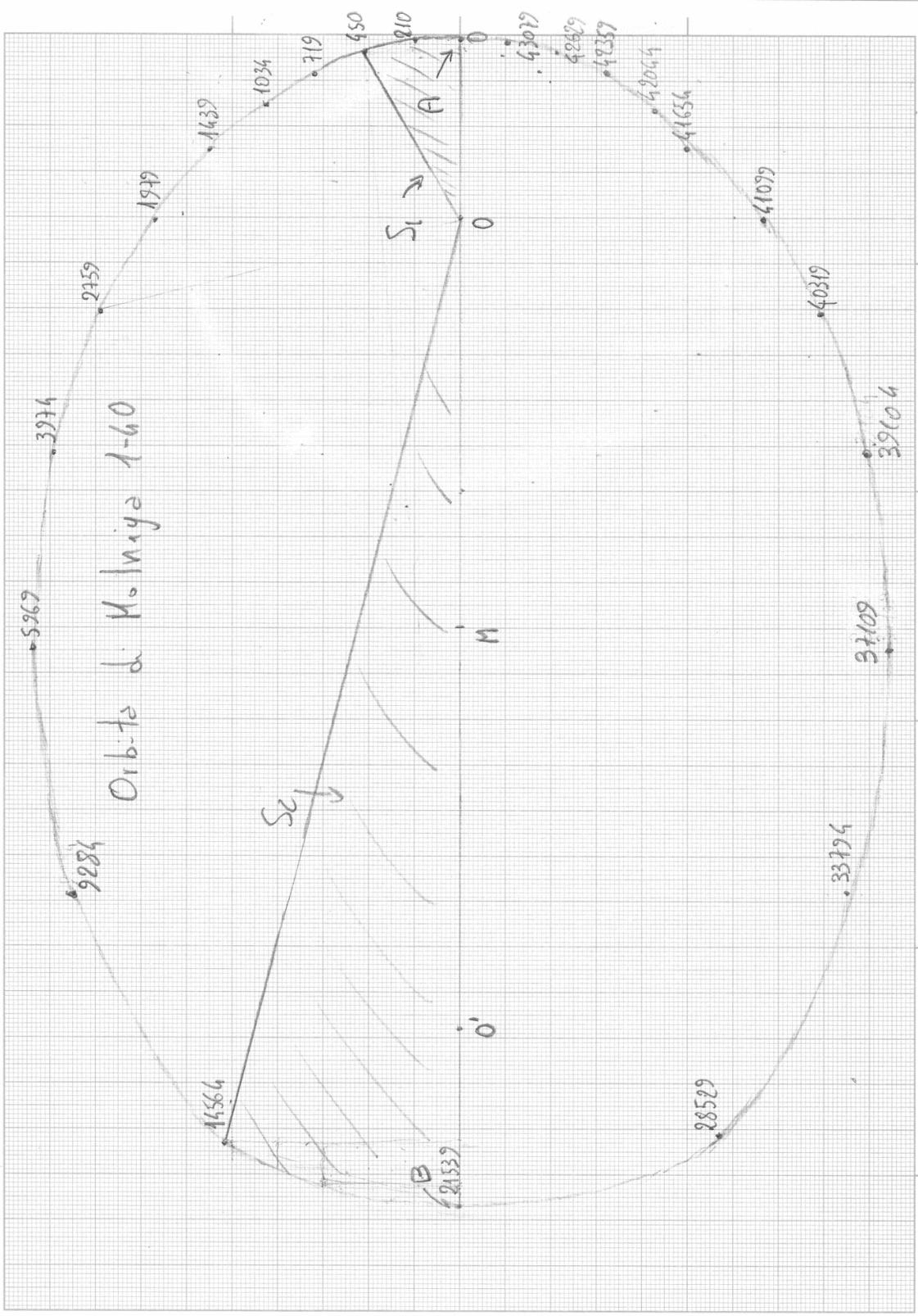
Orbita delle ISS



tempo [s]	distanza [km]	distanza_punto [cm]	anomalia vera [gradi]
0	7861	3,9	0
210	7965	4,0	15
450	8310	4,2	30
719	8938	4,5	45
1034	9897	4,9	60
1439	11334	5,7	75
1979	13388	6,7	90
2759	16351	8,2	105
3974	20641	10,3	120
5969	26663	13,3	135
9284	34298	17,1	150
14564	41889	20,9	165
21539	45287	22,7	180
28529	41870	20,9	195
33794	34290	17,1	210
37109	26653	13,3	225
39104	20631	10,3	240
40319	16342	8,2	255
41099	13381	6,7	270
41654	11273	5,6	285
42044	9894	4,9	300
42359	8937	4,5	315
42629	8310	4,2	330
42869	7965	4,0	345
43079	7861	3,9	360

In questo caso, si osserva che la distanza del satellite dal centro della Terra non è costante: il suo valore minimo vale 7861 km, corrispondente all'anomalia vera di 0°, il suo valore massimo vale 45287 km, corrispondente all'anomalia vera di 180°. Le due posizioni appena descritte si chiamano rispettivamente perigeo (punto in cui il satellite ha distanza minima dalla Terra) e apogeo (punto in cui il satellite ha distanza massima dalla Terra). Non è un caso che l'anomalia di 0° corrisponde alla distanza minima del satellite dal centro della Terra, poiché la semiretta di riferimento per gli angoli definiti dall'anomalia vera è quella su cui giace il perigeo. Il periodo di rivoluzione vale 43079 secondi, cioè 11 ore 57 minuti e 59 secondi. Anche in questo caso tracciamo l'orbita su un foglio di carta millimetrata, avendo cura di posizionare il centro della Terra in modo da lasciare a sinistra almeno 22,7 cm, quindi, se abbiamo un foglio A4, è opportuno posizionare il centro della Terra a 4 cm dal margine destro. Si può notare che la forma dell'orbita non è circolare, assomiglia ad una circonferenza schiacciata, e si potrebbe trattare di un'ellisse.

Orbite di Molniya 1-60



Le tre leggi di Keplero

Verifichiamo che i dati rilevato per le orbite dei due satelliti, cioè la ISS e Molniya 1-40 verificano le tre leggi di Keplero (la cui formulazione sostituisce il Sole con la Terra e la Terra con il Satellite).

Prima legge di Keplero

L'orbita che descrive un pianeta intorno al Sole è un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi; la legge applicata ai satelliti diventa: l'orbita che descrive un satellite intorno alla Terra è un'ellisse, di cui la Terra occupa uno dei due fuochi.

Per la Stazione Spaziale Internazionale: l'orbita sembra circolare, ma la circonferenza è il caso particolare di un'ellisse con i due fuochi sovrapposti che coincidono con il centro; questo è vero perché l'ellisse è quella linea di cui ogni punto ha la somma delle sue distanze dai due fuochi costante.

Per il satellite Molniya 1-40, uniamo il perigeo (punto A) con l'apogeo (punto B) e otteniamo l'asse maggiore dell'ellisse. Se la Terra occupa uno dei due fuochi (punto O), il secondo fuoco deve distare dal perigeo quanto la Terra dista dal perigeo, cioè 3,9 cm (usando la scala si può calcolare la distanza vera). Possiamo così disegnare l'altro fuoco O'. Consideriamo ad esempio il terzo punto della tabella ($t = 450$ s), con un righello misuriamo la distanza da O, che vale 4,2 cm e la distanza da O', che vale 21,5 cm. La somma di queste due distanze vale 25,7 cm. Consideriamo adesso l'ottavo punto, che dista 8,2 cm da O e 17,5 cm da O'. Anche in questo caso la somma delle distanze vale 25,7 cm. Si può verificare che, a meno di errori grafici, questa proprietà vale per tutti i punti rilevati.

Seconda legge di Keplero

Il raggio vettore che congiunge il centro del Sole con quello di un pianeta spazza aree uguali in tempi uguali; la legge applicata ai satelliti diventa: il raggio vettore che congiunge il centro della Terra con un satellite spazza aree uguali in tempi uguali, cioè il rapporto fra l'area spazzata dal raggio vettore che unisce il centro della terra con un satellite ed il tempo trascorso è costante.

Per la Stazione Spaziale Internazionale, la cui orbita è circolare, l'area che spazza il raggio vettore è proporzionale all'angolo e si vede bene dai dati che l'angolo, a meno di errori di misurazione, è proporzionale al tempo: i primi 90° , ad esempio vengono descritti in 1380 secondi. $1380 \text{ s} \times 4 = 5520 \text{ s}$ che differisce di soli 44 s dal periodo di rivoluzione (pochi rispetto ai 5564).

Per il Satellite Molniya 1-40 osserviamo, ad esempio, che: il raggio vettore descrive l'area S_1 nel tempo $t_1 = 450$ s. Dividendo S_1 in un triangolo e una zona di cui si possono contare facilmente i quadrettini (ciascuno dei quali ha area 1 mm^2), si ottiene $S_1 = 400 \text{ mm}^2$. L'area S_2 vale circa 5700 mm^2 ed è percorsa nel tempo compreso fra 14564 s e 21539 s cioè $t_2 = 21539 \text{ s} - 14564 \text{ s} = 6975 \text{ s}$. Il rapporto $S_1 : t_1 = 400 \text{ mm}^2 / (450 \text{ s}) = 0,89 \text{ mm}^2/\text{s}$. Il rapporto $S_2 : t_2$ vale $0,82 \text{ mm}^2/\text{s}$. I due valori differiscono del 8% circa, giustificabile dall'imprecisione grafica del disegno a mano libera; la precisione è migliorabile realizzando i grafici tramite un foglio di calcolo.

Terza legge di Keplero

Il quadrato del periodo di rivoluzione di un pianeta intorno al Sole è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell'ellisse descritta dall'orbita; in questo caso la legge, applicata ai satelliti intorno alla Terra diventa: il quadrato del periodo di rivoluzione di un satellite intorno alla Terra è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell'orbita ellittica.

Per la Stazione Spaziale Internazionale: il semiasse maggiore dell'orbita è il suo raggio e vale $a_{ISS} = 6790$ km. Il periodo di rivoluzione della ISS vale $T_{ISS} = 5564$ s.

Il rapporto fra il quadrato del periodo di rivoluzione della ISS ed il cubo di a_{ISS} vale $T_{ISS}^2 : a_{ISS}^3 = 5564^2 / 6790^3$ $s^2 / km^3 = 9,89 \times 10^{-5} s^2 / km^3$.

Per il satellite Molniya 1-40, il semiasse maggiore dell'orbita è dato dalla metà della somma delle distanze di apogeo e perigeo: $a_{molniya} = (45287 \text{ km} + 7861 \text{ km}) : 2 = 26574$ km. Il periodo di rivoluzione vale 43079 s, quindi il rapporto fra il quadrato del periodo di rivoluzione di questo satellite ed il cubo del semiasse maggiore della sua orbita vale $T_{molniya}^2 : a_{molniya}^3 = 43079^2 / 26574^3 s^2 / km^3 = 9,89 \times 10^{-5} s^2 / km^3$.

? *A che cosa servono i satelliti artificiali?*

Quanto vale l'altezza minima a cui volano i satelliti?

Perché un satellite non ha bisogno di motori?

Cosa affermano le tre leggi di Keplero?