

ALMA MATER STURDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA ED ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE/MECCANICA
Codice 8263: Classe: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In: ING-IND/05 Fondamenti di Meccanica Orbitale

Indagine sulle possibilità di occultazione operate dal Toro di Io
sulle missioni Juno ed Europa Clipper

CANDIDATO
Giancorrado Brighi

RELATORE
Paolo Tortora

CORRELATORE
Marco Zannoni

Anno Accademico 2018/2019

SOMMARIO

Questo elaborato si propone di valutare le opportunità di occultazione operate dal toro di plasma di Io sulle comunicazioni tra le sonde Juno ed Europa Clipper, in orbita attorno a Giove, con la Terra. Lo scopo ultimo della tesi è studiare la science phase di due missioni interplanetarie e ottenere dati quantitativi sulla presenza di un *frequency shift* nelle portanti dei segnali trasmessi dalle sonde, ottenerne un andamento nel tempo e localizzare le finestre temporali di missione in cui questo non sia nullo. Di tutte le reali possibili cause di un'alterazione frequenziale la sola di interesse è il plasma contenuto nel toro di Io, dunque il problema è stato affrontato trascurando fenomeni di multipath, interferenze prodotte dalla ionosfera di Giove o della Terra, o ancora il rumore di trasmettitore e ricevitore.

Con l'ausilio del software MATLAB e del suo toolkit MICE si è ricreato il modello matematico del toro di Io proposto da Phipps, assialsimmetrico e tempo invariante, ottenuta un'evoluzione temporale della posizione di sonde e Terra nel tempo e integrata la densità elettronica locale dovuta al plasma lungo le diverse congiungenti, immaginate per semplicità coincidenti con le traiettorie del segnale elettromagnetico. Dal contenuto totale di elettroni tra sonda e Terra in un dato istante si è ottenuto il path delay, e poi il frequency shift, per poi passare all'istante successivo e ripetere il calcolo per un intervallo di tempo ampio a piacere. Il movimento del segnale elettromagnetico si è considerato infinitamente veloce (non si sono usati parametri correttivi relativi al light time), e si è usata una configurazione One-Way del link sonda-Terra.

Ogni missione è stata studiata in modo indipendente, ma seguendo un comune approccio al problema. Dopo averle introdotte con qualche cenno agli obiettivi e al payload, con particolare attenzione ai sistemi di comunicazione con la Terra, si sono studiate di Juno e di Europa Clipper prima la traiettoria in base ai kernels utilizzati, e poi si sono cercate e valutate le occultazioni. Con una tabella finale si riassumono i risultati in modo rigoroso, mentre con alcuni grafici si cerca di giustificare l'occorrenza delle interferenze in certe zone di determinate orbite, rendendo un po' più intuitiva e tangibile la natura fortemente geometrica del fenomeno dell'occultazione.

Parole chiave

Juno – Europa Clipper – Io Plasma Torus (IPT) – Radio Scienza – IPT Occultation Opportunities

INDICE

Introduzione	6
1. Il sistema gioviano	7
1.1 Il gigante gassoso e i suoi satelliti	7
1.2 Io	8
1.3 Magnetosfera di Giove	9
2. Toro di plasma di Io (IPT)	11
2.1 Rilevazioni e genesi del modello Bagenal & Sullivan	11
2.2 Modello di Phipps semplificato	14
2.3 Modello di Phipps sofisticato	15
3. Algoritmo per l'individuazione delle opportunità di occultazione	19
3.1 MICE: caricamento dei kernels e costruzione del centrifugal frame.....	19
3.2 Funzione di densità elettronica calcNe	22
3.3 Funzione di integrazione lungo la linea di vista calcTEC	23
3.4 Script per il calcolo del frequency shift	25
3.5 Grafici di profili e traiettoria	26
4. Missione Juno	29
4.1 Traiettoria di Juno	30
4.2 Opportunità di occultazione	33
5. Missione Europa Clipper	40
5.1 Traiettoria di Europa Clipper	42
5.2 Opportunità di occultazione	48

6. Conclusione	70
Bibliografia	71
Sitografia	72

INTRODUZIONE

Nonostante l'elevata quantità di carburante che una sonda richieda per essere portata in orbita intorno alla Terra, e di qui lanciata nello spazio per arrivare fino a Giove, ad oggi il gigante gassoso è stato visitato un totale di nove volte da sonde esclusivamente prive di equipaggio. La sua grande massa lo rende privilegiata sede di manovre di flyby per qualunque missione verso le zone più esterne del Sistema Solare, e dalla *Pioneer 10*, passando per *Voyager 1* e *Voyager 2*, fino alle sonde *Ulysses* e *Cassini*, ognuna ha potuto vedere più o meno da vicino il pianeta, la sua celebre macchia Rossa, e alcuni dei suoi settantanove satelliti naturali. Non si è persa l'occasione di scattare diverse fotografie, alcune, in bassa qualità, anche ai satelliti galileiani, fare rilevazioni scoprendo l'intensità della magnetosfera di Giove, la forte attività vulcanica della luna chiamata Io, e la presenza di acqua ghiacciata sulla superficie di Europa.

La missione Juno attualmente in corso, e la missione Europa Clipper, programmata per il lancio nel 2025, avranno come scopo non quello di avvicinarsi a Giove per una manovra di *gravity assist*¹, ma di entrare in orbita attorno ad esso, con il preciso scopo di studiarne il sistema. Si tratta di missioni con una *science phase*² lunga e interamente dedicata a raccogliere informazioni sul sistema gioviano: rilevazioni sulla composizione, il campo di gravità e quello magnetico di Giove nel caso di Juno, indagini sulla luna galileiana Europa nel caso di Europa Clipper.

Lo scambio di informazioni attraverso lo spazio avviene attraverso un sistema di comunicazione radio più o meno complesso con onde ad alta frequenza. Una classica interfaccia trasmettitore – ricevitore mette in collegamento due terminali a centinaia di milioni di chilometri di distanza l'uno dall'altro, e se un'alta frequenza può prevenire la degradazione del messaggio su lunga tratta, non può eliminare un'occultazione radio, ovvero la presenza di un ostacolo di qualunque natura che si frapponga tra ricevitore e trasmettitore lungo la traiettoria del segnale [Phipps, 2017]. Qualunque ambiente carico elettricamente, o anche complessivamente neutro ma parzialmente carico (plasma), è una fonte di occultazione per un segnale radio che lo attraversi. Viaggiando tra la Terra e il sistema gioviano, oltre alle ionosfere dei due pianeti e delle lune di Giove, vi è anche una magnetosfera molto intensa e una quantità di plasma fuori dall'ordinario. L'insolito vulcanesimo del satellite naturale Io è responsabile dell'immissione di una tonnellata di materiale neutro al secondo nella magnetosfera circostante, che ruotando solidalmente a Giove trascina con sé parte di questo materiale dopo averlo elettrizzato per urto con elettroni. Il risultato è la presenza di una struttura di forma toroidale chiamata toro di plasma di Io, un volume di plasma rotante intorno a Giove a circa 5.9 volte il raggio equatoriale del pianeta dal centro del pianeta stesso [Phipps, 2017].

Le occultazioni radio dovute ad esso sporcano le comunicazioni, falsando il messaggio attraverso quello che si definisce un *frequency shift*, una variazione nella frequenza dell'onda trasmessa: l'onda arriverà sempre a destinazione, ma sarà alterata nel suo contenuto dall'attraversamento del toro da parte del segnale [Phipps, 2017]. È dunque essenziale, per poter poi giudicare attendibili i dati ricevuti dal sistema gioviano, capire prima dell'inizio della science phase di una missione quando e con quale intensità il toro sarà responsabile di occultazioni, così da poter modificare la frequenza del segnale ricevuto con lo shift indotto dall'occultazione, “recuperando” il segnale originale trasmesso dalla sonda.

Valutare le cosiddette **opportunità di occultazione** durante la science phase delle missioni Juno ed Europa Clipper operate dal **toro di Io** sarà lo scopo dell'elaborato, che si presenta strutturato in

¹ Manovra che sfrutta la gravità di un pianeta combinata al suo moto per generare un Δv (variazione di velocità) su una sonda senza bisogno di consumarne parte del combustibile stivato.

² Fase della missione dedicata alla raccolta di dati ed analisi in situ.

diverse sezioni. La **sezione 1** tratta il sistema gioviano, e in particolare il ruolo di Io nel dare forma alla magnetosfera di Giove, si prosegue con una analisi del toro di Io e del modello matematico utilizzato per ricostruirlo nella **sezione 2**. All'interno della **sezione 3** si studia l'algoritmo implementato per studiare le opportunità di occultazione sulle due missioni di interesse. Seguono una **sezione 4** dedicata a Juno, dove viene fornita qualche informazione relativa alla sonda, alla traiettoria, e naturalmente ai risultati dell'indagine; nella **sezione 5** si affronta in maniera analoga la missione Europa Clipper. La **sezione 6** contiene una conclusione dell'elaborato.

1. Il Sistema di Giove

1.1 Il gigante gassoso e i suoi satelliti

Il sistema gioviano ruota intorno al gigante gassoso Giove, così definito perché composto principalmente da idrogeno (75%) ed elio (24%), con qualche traccia di altri elementi più pesanti [*Jupiter-in depth*, 2019]. Il pianeta possiede uno strato più esterno di idrogeno molecolare, seguito da un cuore più interno di idrogeno metallico che si estende fino al 78% (dal centro) del raggio di Giove, ovvero idrogeno capace di condurre elettricità per le alte temperature e pressioni cui risulta sottoposto. Sotto tutto questo è probabilmente nascosto un nucleo roccioso fuso, la cui presenza appare ragionevole, sostenuta da rilevazioni sulla gravità del pianeta, e certificata se non altro in determinate fasi della storia di Giove (ad esempio durante la formazione del pianeta stesso). Tra gli obiettivi della missione Juno vi è anche quello di ottenere più precisi parametri per la modellizzazione del nucleo del pianeta [*Bolton*, 2010].

A separare l'atmosfera del pianeta, con idrogeno gassoso combinato a formare ammoniaca, dalla zona di idrogeno metallico liquido, vi è uno strato intermedio di idrogeno in condizione supercritica³. Quella che viene di Giove definita atmosfera è convenzionalmente, data la mancanza di una superficie solida, fatta partire dal punto in cui la pressione atmosferica è di 100kPa. Si tratta di un banco di nubi, composte principalmente di cristalli di ammoniaca, raccolte in bande più o meno scure che ruotano in senso opposto e a diverse latitudini [*Jupiter-in depth*, 2019].

³ Condizione caratteristica dei fluidi in cui non si riesce a distinguere fase liquida da fase gassosa.

Dati utili su Giove



Foto di Giove scattata dalla Nasa.

Raggio medio	69911 km
Raggio equatoriale	71492 km
Massa	$1.8982 * 10^{27} kg$
$\mu = G * M_j$	$126596600 km^3 / s^2$
Densità media	$1.326 kg / m^3$
Distanza media tra le orbite di Giove e della Terra	$6.3 * 10^8 km$
Velocità angolare	$1.76 * 10^{-4} rad / s$

Attualmente sono state scoperte 79 lune totali orbitanti intorno a Giove, satelliti naturali imprigionati nella sua sfera di influenza e soggetti prima alla sua gravità che a quella del Sole o di un qualunque altro corpo all'interno del sistema solare. Otto di essi sono satelliti regolari, ovvero dotati un'orbita prograda, dunque coerente con il senso di rotazione di Giove, quasi circolare e con lieve inclinazione rispetto al piano equatoriale del gigante gassoso. Gli altri satelliti sono detti irregolari per la larghezza delle loro orbite, ben più grandi di quelle dei satelliti regolari, le elevate inclinazioni ed eccentricità [Jupiter-in depth, 2019].

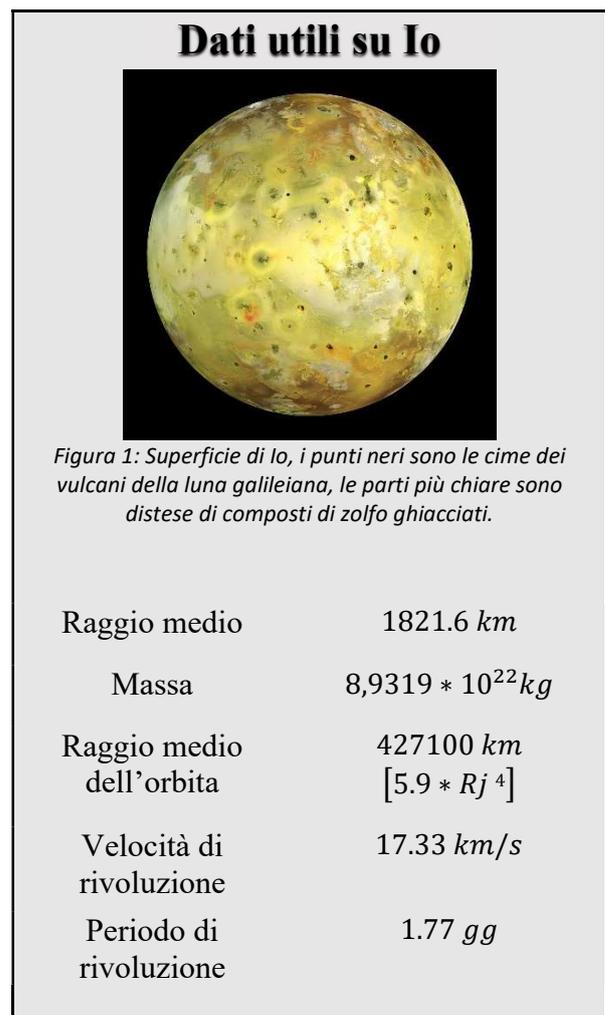
Le quattro lune Galileiane Io, Europa, Ganimede e Callisto, in ordine dal satellite con orbita più stretta a quello con orbita più larga, rientrano tra i satelliti regolari, e tra i più grandi corpi di tutto il sistema solare (togliendo Sole e pianeti). Dispongono di orbite tra di loro quasi concentriche e complanari, e i periodi orbitali di Io, Europa e Ganimede sono tali da porre in risonanza orbitale le tre lune Galileiane più interne, con un rapporto 4:2:1. Ciò significa che ogni quattro rivoluzioni complete di Io intorno a Giove, due di Europa e una singola di Ganimede, i tre satelliti si troveranno su una stessa radiale scaturente dal centro di Giove. L'effetto di questo fenomeno è creare particolari combinazioni di azioni gravitazionali tra le lune, responsabili, nel corso della storia, della forma assunta dalle stesse, e tutt'ora di alcune delle loro caratteristiche [Jupiter-in depth, 2019].

È proprio dalla risonanza orbitale tra questi tre corpi, o risonanza di Laplace, che Io eredita la peculiare vulcanicità della sua superficie, da una risonanza fortuita nel moto di questi tre satelliti che nasce la sorgente principale della grande quantità di plasma che continua a fluire all'interno della magnetosfera di Giove formando il toro di plasma di Io.

1.2 Io

Io è dimensionalmente poco più grande della Luna della Terra, ha un raggio medio di 1821.3 km, uguale ad 1.05 quello della Luna, mentre la supera di quasi un quarto in massa raggiungendo $8.9319 \cdot 10^{22} \text{ kg}$ [Bagenal, 2004].

Vulcanismo La differenza sostanziale, evidente notando la presenza di più di 400 vulcani attivi sulla sua superficie (figura 1) contro l'assenza completa di attività vulcanica sulla nostra Luna, è spiegabile con la sopracitata definizione di risonanza orbitale, e l'annesso concetto di sforzo mareale [Peale, 1979]. Giove per primo è responsabile di una forte azione gravitazionale su Io, per secondi la rotazione di Ganimede ed Europa, che con regolare cadenza porta ad una loro sovrapposizione, determinano una variazione continua degli sforzi mareali generati sulla superficie del satellite naturale. La mutevole disposizione di masse intorno alla luna di Giove, sia



⁴ Raggio gioviano: $R_j = 71492 \text{ km}$

come geometria che come distanze, crea un sempre diverso grado di distorsione della crosta esterna di Io, alterandone la forma e creando violente frizioni tra blocchi superficiali. Dalla frizione scaturisce calore, ed è proprio questo surriscaldamento del satellite naturale a determinarne l'intensa attività vulcanica che gli è caratteristica. Colate di materiale incandescente ricoprono continuamente la superficie, per poi raffreddarsi e congelarsi nel tempo, rendendola geologicamente giovane e quasi del tutto priva di crateri [Peale, 1979]. Sono zolfo e diversi suoi composti formati da ossigeno e cloro i principali prodotti del forte vulcanismo di Io, e oltre a conferire alla sua superficie una particolare colorazione giallognola, danno forma ad una atmosfera irregolare poco densa. Sarebbe più corretto parlare di una nube di monossido e diossido di zolfo, cloruro di sodio, zolfo atomico ed ossigeno, diffusa tutta intorno al satellite naturale per 5-6 raggi di distanza [Khurana, 2004].

Questa nuvola di materiale neutro, continuamente rigenerata dalla attività dei vulcani entro l'atmosfera della luna galileiana, fornisce un flusso continuo di materia prima che può prestarsi a ionizzazione ad opera della magnetosfera di Giove [Phipps, 2017]. Non è un caso che Io svolga una funzione determinante nel dare forma alla magnetosfera gioviana.

Orbita Il piano dell'orbita di Io è inclinato di 0.05 gradi rispetto al piano equatoriale di Giove e ha un'eccentricità molto piccola di 0.0041 grazie alla risonanza con Europa e Ganimede; in assenza di queste due ulteriori lune l'orbita del satellite naturale si circolarizzerebbe portando a zero la sua eccentricità [Yoder, 1979]. Conoscendo il raggio medio $R_m = 427100km$ e ricordando l'equazione della prima velocità cosmica, possiamo ottenere la velocità di rivoluzione di Io conoscendo raggio dell'orbita quasi circolare e costante planetaria di Giove [Mengali, 2013].

$$V_{Io} = \sqrt{\frac{\mu}{R_m}} = 17.33km/s$$

Il periodo di rivoluzione è di 1.77 giorni, ovvero circa 42 ore.

1.3 Magnetosfera di Giove

La magnetosfera di un corpo celeste è una zona dello spazio dove il campo magnetico generato dal corpo medesimo esercita la propria influenza, una sfera disposta attorno ad un pianeta dove le forze magnetiche prevalgono su qualunque altra forza. Nel sistema solare la capacità dei campi magnetici dei pianeti di schermare il vento solare fa sì che le magnetosfere si configurino come "cavità" create nel vento solare diffuso nello spazio. Il plasma del vento solare e la magnetosfera sono distinti da un sottile strato chiamato magnetopausa. Condizione necessaria alla loro esistenza è dunque la presenza di un campo magnetico, la cui forma sarà anche determinante nel dare una certa geometria alla magnetosfera [Khurana, 2004].

Quella di Giove è la magnetosfera più intensa ed estesa di tutto il sistema solare, ed è sotto osservazione diretta sin dal 1973, con la sonda *Pioneer 10*. Il pianeta, alla stregua della Terra, si comporta da dipolo magnetico, non tanto per la presenza di grandi quantità di materiale ferroso disposte in punti diversi, ma per via delle forti correnti elettriche che si muovono nella zona liquida di idrogeno metallico all'interno di Giove. L'asse del dipolo magnetico è inclinata rispetto a quella di rotazione di Giove di 9.6 gradi a longitudine 200.8 gradi nel riferimento *System III* convenzionalmente sinistrorso [Phipps, 2017]; dunque è un asse che conservando la propria inclinazione rispetto al piano equatoriale ruoterà in modo continuo con la stessa velocità angolare di

Giove. È anche opportuno precisare che visualizzare il campo magnetico come generato da un dipolo perfetto sia in realtà una semplificazione, comunque abbastanza vicina al vero; nella realtà vi sono più multipoli, ovvero strutture di ordine superiore al secondo introdotte matematicamente per modellizzare più correttamente il potenziale di un certo campo [Phipps, 2017].

Il ruolo di Io Io ruota intorno a Giove ad una distanza di 5.9 R_J dal suo centro, mantenendosi approssimativamente sul suo piano equatoriale, e come si è detto porta con sé una nube di materiale neutro con un raggio quasi sei volte più ampio di quello del satellite naturale. Si immagini dunque di avere una sfera di zolfo atomico, molecole di zolfo, diossido di zolfo, ossigeno, cloro, sodio, potassio e polveri di cloruro di sodio che ruota a velocità 17.33 km/s intorno a Giove e sul suo piano equatoriale [Khurana, 2004]. Contemporaneamente il campo magnetico starà ruotando con la velocità angolare di Giove, che moltiplicata per un certo raggio può darci la velocità di rotazione tangenziale del campo, e dunque della magnetosfera. A 5.9R_J avremo questa velocità tangenziale:

$$V_{mag} = \omega * 5.9 * R_J = 74.23 \text{ km/s}$$

Due successivi processi portano alla diffusione del plasma all'interno della magnetosfera di Giove [Phipps, 2017; Khurana, 2004] (figura 2). Per prima cosa il plasma deve formarsi, e lo fa per ionizzazione dell'ampia nube neutra intorno ad Io. Una tonnellata al secondo di materiale viene diffuso intorno al satellite e viene travolto da particelle cariche trascinate dal campo magnetico del pianeta; attraverso l'urto tra elettroni i gas emessi dai vulcani di Io si ionizzano dando forma al

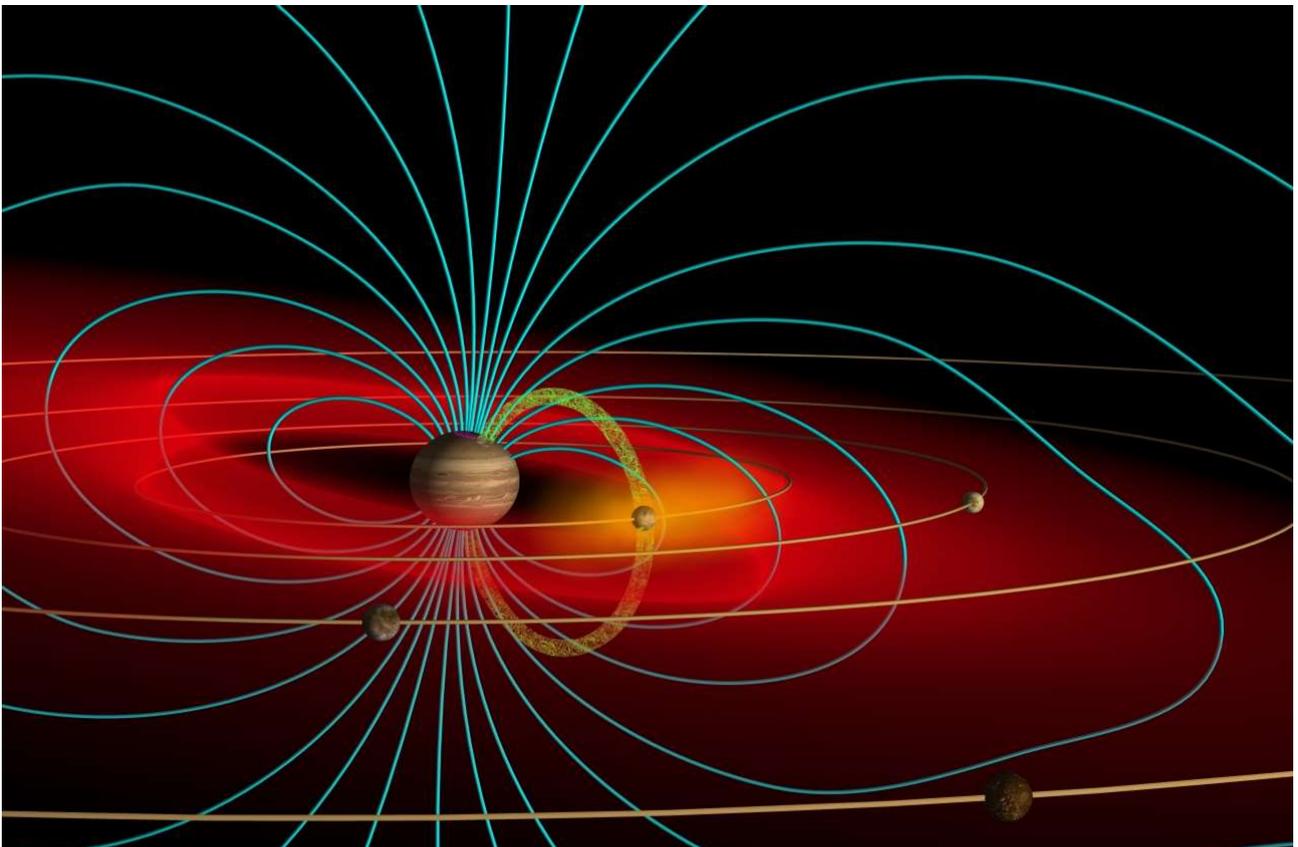


Figura 2: Schematica raffigurazione della magnetosfera di Giove: In azzurro sono rappresentate le linee di campo magnetico, in giallo la nube neutra di materiale intorno ad Io, in verde una linea di flusso per l'evacuazione di ioni dalla Hillsphere di Io, e in rosso il Toro di plasma.

plasma, pur continuando a rimanere nella *Hillsphere*⁵ [Phipps, 2017]. Le vie di uscita e diffusione nel sistema Gioviiano sono a questo punto essenzialmente due:

- 1) Parte del materiale ionizzato si muove lungo le linee di flusso del campo magnetico e raggiunge i poli di Giove dando luogo al fenomeno delle aurore.
- 2) Un'altra ben più importante porzione viene strappata via dalla velocità di rotazione del campo magnetico all'attrazione gravitazionale di Io, i 74 km/s della magnetosfera travolgono e portano con sé ioni in rotazione ai 17 km/s della sfera di influenza di Io [Phipps, 2017].

Toro di Io Questa seconda porzione di plasma non viene casualmente sparpagliata per tutto il sistema gioviano, ma per via della forza centrifuga si raccoglie in un disco, un toro in realtà, definito toro di plasma di Io e co-rotante con Giove a distanza di circa $5.9R_j$ dal suo centro. Questo toro giace su un piano che non è né quello dell'equatore gioviano, né quello normale all'asse del dipolo magnetico; è il cosiddetto piano centrifugo, ovvero il luogo di punti lungo le linee di campo magnetico con il più basso potenziale centrifugo, ovvero alla maggior distanza dall'asse di rotazione del toro stesso [Phipps, 2017]. Visto che la rotazione della magnetosfera è rispetto all'asse di rotazione di Giove, ma le linee di campo che strappano gli ioni conserveranno rispetto ad esso la propria inclinazione di 9.6 gradi, si intuisce che il piano centrifugo si troverà normale ad un asse compreso tra quello di rotazione di Giove e quello magnetico. Precisamente l'asse centrifugo si trova inclinato nella stessa direzione dell'asse magnetico rispetto a quello di rotazione di Giove, ma non di 9.6 gradi, bensì di 6.4 gradi [Phipps, 2017]. Questo è il motivo della forma meno simile ad una goccia, come nel caso della Terra, e più schiacciata e simile ad un disco della magnetosfera gioviana; non è un caso che spesso si parli di disco magnetico o magnetodisk. La natura puramente semplificativa della visualizzazione della magnetosfera come generata da un perfetto asse di dipolo magnetico si estende anche all'idea di un piano centrifugo perfettamente piatto ed assialsimmetrico.

Nel tempo, un po' per diffusione, ed un po' per l'effetto di gradienti di pressione magnetica all'interno della magnetosfera (*Flux tube interchange*), il plasma lentamente si allontana da Giove, perdendo progressivamente di velocità e non riuscendo a stare al passo con la rotazione del pianeta. A circa $40 R_j$ si può dire che il plasma abbia ormai abbandonato il campo magnetico, e non sia più parte della magnetosfera di Giove.

2. Toro di plasma di Io (IPT)

2.1 Rilevazioni e genesi del modello Bagenal & Sullivan

Una volta capito il ruolo del satellite Io nella diffusione di plasma all'interno della magnetosfera di Giove, e dopo aver visualizzato, almeno qualitativamente, come spazialmente si posizioni il toro (in inglese Io Plasma Torus – IPT), si può scendere un po' più nel dettaglio, cercando di trovare un modo per modellizzare questo “virtuale contenitore di plasma” del sistema gioviano.

Per stimare quando il toro si frapponga tra la sonda, Juno od Europa Clipper, e la Terra, intercettando e occultando il segnale radio, è fondamentale, previa determinazione di una terna di riferimento ortogonale nello spazio in studio, determinare il vettore congiungente sonda e Terra, e verificare qualora questo attraversi in uno o più punti il toro. Diventa dunque necessario definire un campo scalare che associ ad ogni punto dello spazio non solo la presenza o meno dell'IPT, ma anche il

⁵ Sfera di influenza di Io, zona dove la gravità di Io prevale su quella di Giove e di qualunque altro corpo celeste.

contenuto di plasma locale, al quale sarà proporzionale l'entità dell'occultazione. La quantità matematica che farà da indicatore del contenuto locale di plasma sarà la densità elettronica, ovvero una funzione che associa ad ogni punto dello spazio una data quantità di elettroni; la sua unità di misura sarà il cm^{-3} .

Metodi di Rilevazione Per ottenere tutte le informazioni quantitative sul toro di Io che sono alla base del modello matematico utilizzato in questo elaborato, il modello di Philip H. Phipps, si è fatto uso di diverse tecniche di rilevazione remota ed in situ, le cui dinamiche esulano dallo scopo della Tesi, ma cui può essere interessante fare qualche cenno per capire da dove provengano certi dati così importanti per cominciare questa indagine.

L'avviamento della missione Juno ha tra i propri scopi anche quello di perfezionare il modello del toro di plasma attualmente utilizzato sfruttando il frequency shift indotto dal toro sul segnale con un algoritmo opposto rispetto a quanto sarà fatto in questa tesi. In questo elaborato partendo da un

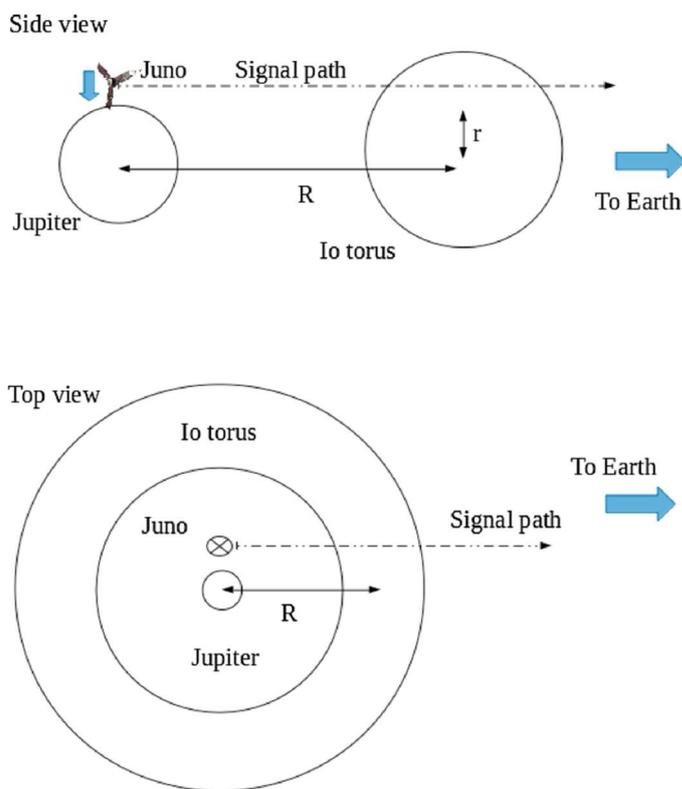


Figura 3: Visualizzazione schematica del concetto di occultazione del segnale da Juno alla Terra ad opera del Toro di Io.

modello del toro e da dati sulle missioni Juno ed Europa Clipper si cercherà di fare una stima a priori sulla futura entità e occorrenza delle occultazioni durante la science phase. Invece che partire da una densità elettronica nota ed arrivare a prevedere un frequency shift si può capovolgere il problema. Si può rilevare un certo frequency shift durante le comunicazioni con Juno, e a partire da questo risalire prima all'integrale della densità elettronica lungo il *ray path*⁶ del segnale (*Total electron content – TEC*), poi alla reale funzione di densità elettronica. È così che lo stesso Phipps ha potuto nel 2019 aggiornare il proprio precedente modello del 2017, anche se apportando marginali variazioni più che altro ad alcuni parametri notevoli, ed è proprio il modello aggiornato al

2019 quello usato in questo elaborato.

Prima di Juno si sono utilizzati metodi di misurazione ottici e ad infrarossi *ground-based*, cioè lanciati direttamente dalla Terra, e capaci di rilevare composizione, densità e temperatura del plasma nel toro sulla base dell'intensità delle onde emesse da specifiche specie di ioni presenti nell'IPT [Phipps, 2017]. La sonda *Voyager 1* durante il suo flyby di Giove nel marzo 1979, *Galileo* durante il suo tour orbitale tra 1995 e 2003, e *Cassini* durante il flyby tra 2000 e 2001, sono state autrici di altre osservazioni grazie a spettrometri capaci di vedere in ultravioletto (UVS), e a strumenti di misurazione operanti in situ (*in situ plasma instrument - PLS*) [Phipps, 2017]. La combinazione dei

⁶ Linea lungo la quale viaggia il segnale radio, può anche essere definita line of sight e può essere, semplificando in modo abbastanza importante, considerata corrispondente alla congiungente tra spacecraft e Terra.

risultati ottenuti mediante UVS e PLS ha permesso di mappare l'estensione spaziale dell'IPT, quantificarne la distanza dal centro di Giove e la quota perpendicolarmente al piano centrifugo. Le sonde *Voyager 1* ed *Ulysses* hanno anche condotto misurazioni sulle occultazioni alla stregua di quel che avrebbe fatto Juno dopo di loro, e con l'ottenimento di una serie di valori di TEC nel tempo combinati alla conoscenza delle traiettorie di missione è stato possibile risalire ad un modello generale di toro di Io [Phipps, 2017].

Il modello Nel settembre 1981 Fran Bagenal e James D. Sullivan, analizzando in maniera diretta i dati ottenuti dalle misurazioni del *Voyager 1*, offrirono un primo articolato modello dell'IPT⁷, e lo divisero in tre zone differenti per macroscopiche differenze nella temperatura e nella specie di ioni più presente: il cold torus (toro freddo), il ribbon (nastro) e il warm torus (toro caldo) [Bagenal, 1981].

- 1) La zona più interna, con centro a 5.2 Rj dal centro di Giove, è il cold torus. La densità elettronica cala allontanandosi dal piano centrifugo scendendo di un fattore costante di Nepero ogni 0.1 Rj; si dice che l'altezza di scala (scale height) del cold torus sia 0,1 Rj. Il picco di densità si trova a 5.23 Rj, e si estende da 4.9 Rj a 5.5 Rj, con una densità caratteristica di $\sim 1000 \text{cm}^{-3}$. La composizione del cold torus è principalmente di ioni S^+ , con una più bassa presenza di ioni O^+ .
- 2) Segue il ribbon, la cui distanza del centro da quello di Giove è di 5.6 Rj, e la sua estensione va da 5.5 Rj a 5.7 Rj. L'altezza di scala è di 0.6 Rj, e la densità di elettroni è più alta di quella del cold torus: ci aggiriamo intorno ai $\sim 3000 \text{cm}^{-3}$. In questa zona del toro si trova abbondanza di O^+ e una minore quantità di ioni S^+ .
- 3) La regione più esterna del toro è il warm torus, con centro a 5.9 Rj dal centro di Giove, un'altezza di scala di 1 Rj, e un'estensione che va da 5.7 Rj ad 8 Rj. Si tratta della regione più spessa e con maggiore varietà di ioni nonostante una densità elettronica di $\sim 2000 \text{cm}^{-3}$, più bassa rispetto a quella del ribbon. È composto da S^{2+} , O^+ , e qualche traccia di O^{2+} , S^+ ed S^{3+} .

I valori di altezza di scala assegnati alle varie zone del toro sono il risultato di un calcolo matematico che richiede una conoscenza della temperatura e della composizione dell'IPT; non ci sono metodi di rilevazione che abbiano come output diretto l'altezza di scala, ma ve ne sono di capaci di ottenere la temperatura di ioni ed elettroni parallela al campo magnetico. Qui di seguito è richiamata la formula per completezza, ma non se ne farà uso in questo elaborato dove il solo dato richiesto è quello dell'altezza di scala.

$$H = \sqrt{\frac{2k(T_i + Z_i T_e)}{3M_i \Omega^2}}$$

Dove k è la costante di Boltzmann, le temperature T_i e T_e sono le temperature⁸ di ioni ed elettroni, M_i è la massa della specie di ione in considerazione e Ω è la velocità angolare di Giove [Phipps, 2017].

⁷ N.B. I dati forniti nell'analisi di seguito sono quelli proposti da Bagenal e Sullivan, non quelli aggiornati dalle rilevazioni di Juno nell'articolo scientifico del 2019 di Phipps; le differenze sono piccole e legate ai soli numeri, non alla divisione in regioni. Nella parte matematica dell'elaborato sarà fornita una tabella di dati più precisi ed aggiornati al 2019.

⁸ Per essere precisi si tratta delle componenti di temperatura parallele alle linee di campo magnetico, ricordando che a livello microscopico la temperatura si considera strettamente legata all'energia cinetica, dunque alla velocità che è un vettore.

Questa relazione va utilizzata per tutte le specie di ioni presenti in una data regione e le diverse soluzioni vanno combinate tra loro.

Cenni alle semplificazioni In un modello così costruito le differenze all'interno del toro sono funzione della distanza dal centro di Giove e della quota sull'equatore centrifugo, non sono state menzionate variazioni spaziali funzione della longitudine, oppure ancora variazioni temporali nella struttura dell'IPT. In realtà il toro di plasma varia al variare della longitudine del sistema System III per asimmetrie del campo magnetico; si modifica nel tempo, specialmente nel lungo periodo, a causa delle variazioni temporali nella produzione di gas da parte dei vulcani di Io. Anche qui sono ragioni di semplicità ad imporre di trascurare certi aspetti presenti nella realtà per rendere affrontabile il problema a livello matematico [Phipps, 2019].

Esattamente in contemporanea con la stesura di questo elaborato Juno sta portando avanti la sua science phase, e ogni perigiovio della missione è un'occasione per raccogliere informazioni in più sullo stato e sulla dinamica della struttura del toro di Io; nel tempo si disporrà di un banco di dati sempre più ricco e sarà sempre più facile perfezionare il modello dell'IPT considerandone anche i più aleatori fenomeni reali.

2.2 Modello di Phipps semplificato

Ciò che si deve a Phipps non è tanto l'aver proposto un modello di Toro di Io diverso o alternativo rispetto alla struttura proposta da Bagenal e Sullivan, ma di aver preso i dati e l'elaborazione di Bagenal e Sullivan, e di aver di qui sviluppato un modello matematico che permetta la ricostruzione della sopracitata funzione di densità elettronica.

L'approccio al problema è un approccio per gradi, che parte trascurando la divisione del toro in regioni diverse. Se si pensa il toro intuitivamente come un ammasso di ioni ed elettroni, disposto in maniera assialsimmetrica rispetto al centro di Giove, e con un picco di densità ad una precisa distanza

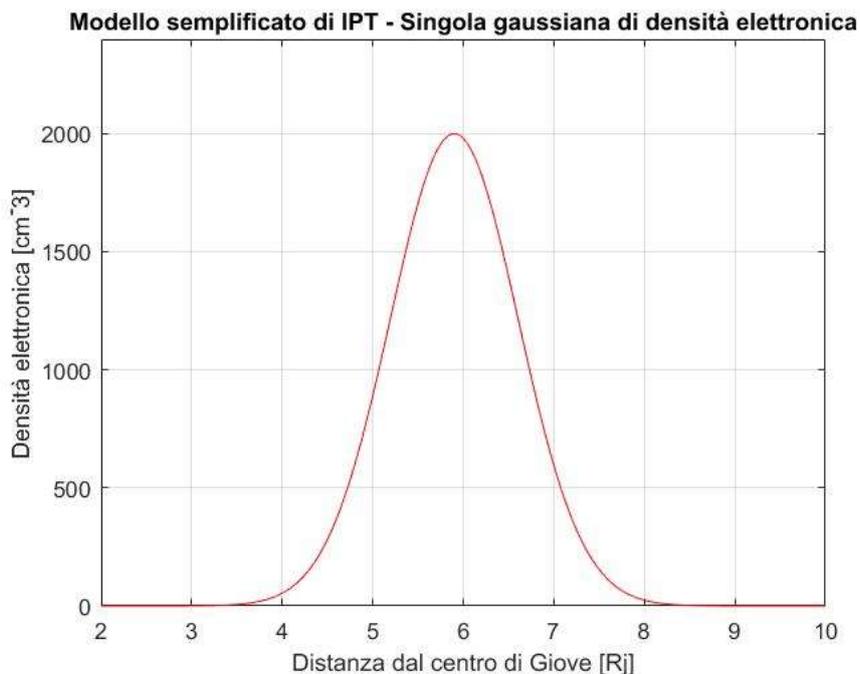


Figura 4: Modello semplificato di distribuzione di densità elettronica secondo una gaussiana centrata a 5.9 Rj.

dallo stesso, la restante densità può pensarsi distribuita in modo aleatorio. In questi casi, quando una variabile casuale (la densità elettronica in questo caso) tende a raccogliersi attorno ad un valor medio, una distribuzione usata come prima approssimazione è quella definita normale o Gaussiana. L'idea di Phipps è proprio quella di utilizzare una distribuzione Gaussiana dipendente dalla distanza s dal centro di toro, e con un picco a 5.9 Rj dal

centro di Giove sul piano centrifugo (figura 4). Dunque,

$$N(s) = N(0) \exp^{-\frac{s^2}{H^2}}$$

dove H è un valore medio di altezza di scala fissato a 1 Rj, mentre N(0) è il picco di densità elettronica nel centro del modellizzato toro di Io, con un valori di 2000cm^{-3} .

Si tratta di uno schema molto semplice, che non fa tesoro dei risultati di tutte le rilevazioni che hanno preceduto la missione Juno, però contiene un'intuizione base che verrà riproposta nel prossimo e più sofisticato modello che si andrà a descrivere, ovvero il fatto di pensare la distribuzione di densità elettronica come gaussiana.

2.3 Modello di Phipps sofisticato

La naturale evoluzione del modello rispetto a quanto visto in precedenza consiste nell'immaginare una distribuzione gaussiana di densità elettronica per ogni regione del toro, per un totale di tre gaussiane descritte da parametri diversi e combinate linearmente a formare la funzione di densità elettronica totale per il cosiddetto toro interno. Al fine di aumentare la precisione con la quale si sta descrivendo l'IPT si tiene conto di come, dopo una distanza di riferimento fissata a 6.1 Rj, il comportamento e le caratteristiche del plasma non siano più efficacemente riassunte da quelle del warm torus, e sia di conseguenza conveniente introdurre una quarta regione, che prende il nome di extended torus (toro esteso).

Piano centrifugo Matematicamente la funzione di densità elettronica come funzione della distanza dal centro di Giove sul piano centrifugo R sarà una combinazione di gaussiane con diversi centri, picchi massimi e spessori:

$$N(R < 6.1Rj) = N_1 * e^{-\frac{(R-C_1)^2}{W_1^2}} + N_2 * e^{-\frac{(R-C_2)^2}{W_2^2}} + N_3 * e^{-\frac{(R-C_3)^2}{W_3^2}}$$

$$N(R > 6.1Rj) = N_4 * e^{-\frac{(R-C_4)^2}{W_4^2}}$$

TAB.1				
Regione	Densità centrale [cm ⁻³]	Altezza di scala [Rj]	Centro della regione [Rj]	Spessore [Rj]
Cold torus	1730	0.18	5.23	0.20
Ribbon	2200	0.71	5.63	0.08
Warm torus	2430	1.13	5.89	0.32
Extended torus	2080	1.13	5.26	1.88

TAB.1 Tabella contenente i dati utilizzati per modellizzare il toro di Io in qualunque parte di questo elaborato, dallo script per la definizione della funzione scalare di densità elettronica al grafico contour dell'IPT che segue.

dove il pedice 1 fa riferimento al cold torus, il pedice 2 al ribbon, il pedice 3 al warm torus, e il 4 all'extended torus. N_i rappresenta il picco di densità elettronica dell' i -esima regione del toro, sempre sul piano centrifugo, C_i indica il centro dell' i -esima zona del toro e W_i il suo spessore. I valori da inserire all'interno dell'equazione sono tabulati in **TAB.1**, e sono aggiornati agli ultimi risultati ottenuti dalle misurazioni di Juno [Phipps, 2019].

L'andamento della densità elettronica sul piano centrifugo si modifica in modo significativo (figura 5).

Si notano i picchi corrispondenti alle distanze cui sono state centrate le gaussiane delle diverse regioni interne del toro, e dove la densità elettronica raggiunge valori più alti dei massimi raggiungibili da ciascuna delle singole gaussiane per la combinazione lineare tra funzione operata per ottenere N . La parte del grafico a distanza maggiore di $6.1 R_j$ non presenta picchi poiché il centro della gaussiana dell'extended torus si trova a $5.23 R_j$, dunque non è una parte interessata dal grafico.

Per evidenziare meglio le differenze tra modelli semplice e sofisticato viene proposto anche un confronto diretto tra i due profili di densità elettronica al variare della distanza di Giove sul piano centrifugo (figura 6).

Quota sul piano centrifugo

A questo

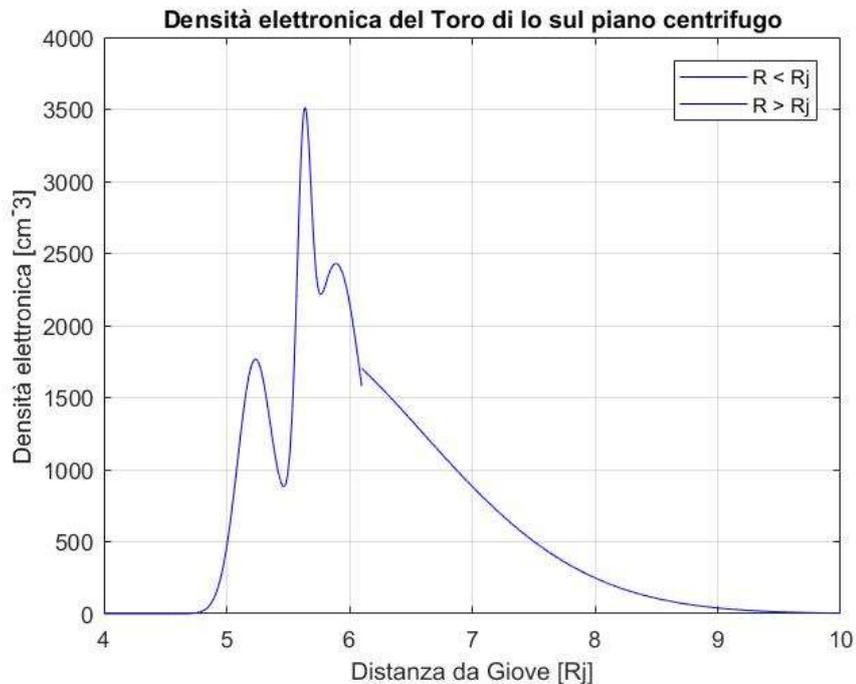


Figura 5: Andamento della densità elettronica sul piano centrifugo secondo il modello sofisticato di IPT

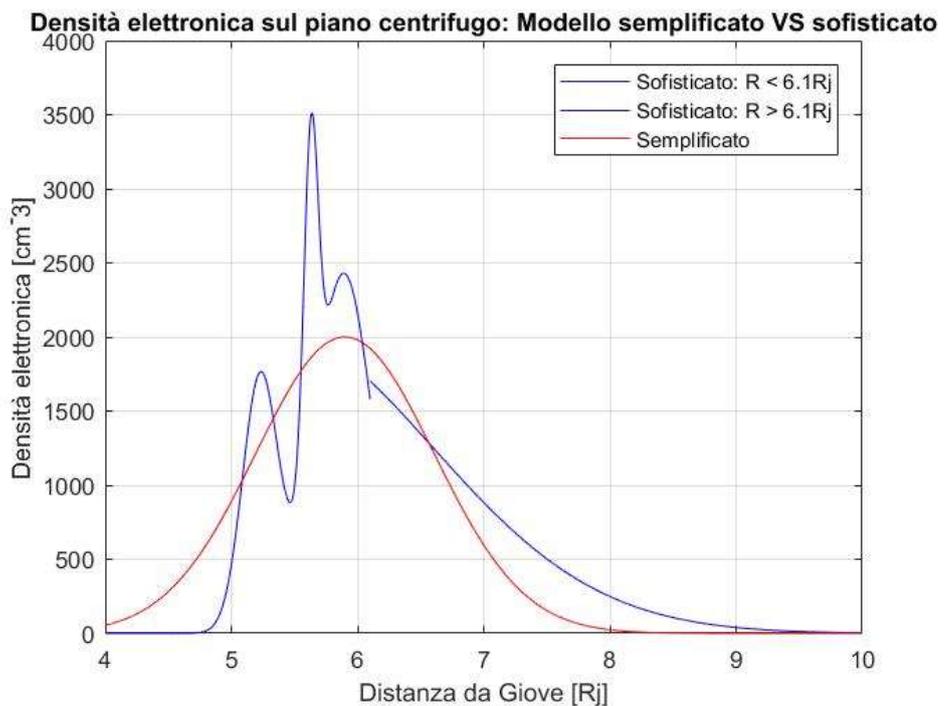


Figura 6: Confronto tra la distribuzione di densità elettronica sul piano centrifugo nei casi semplice e sofisticato di IPT

punto il toro non è completo, si ha a che fare con un semplice disco assialsimmetrico rispetto al centro di Giove e bidimensionale sul piano centrifugo.

Phipps ripropone ancora l'intuizione di utilizzare la gaussiana, ma per uscire dalla singola dimensione R di distanza dal centro di Giove che si sta utilizzando pensa all'intera distribuzione vista fino ad ora come il picco di una gaussiana che si sviluppa fuori dal piano centrifugo, lungo una coordinata r, quota rispetto al piano centrifugo. L'equazione generale per una gaussiana è:

$$N(r) = N(0) * \exp\left(-\frac{r^2}{H^2}\right)$$

dove N(0) è in questo caso la funzione N(R < 6.1Rj) oppure N(R > 6.1Rj) ed la H è l'altezza di scala. Visti i diversi valori di N e di H anche in questo caso avremo una combinazione lineare di funzioni:

$$N(R < 6.1Rj, r) = N_1 * e^{-\frac{(R-C_1)^2}{W_1^2}} * e^{-\frac{r^2}{H_1^2}} + N_2 * e^{-\frac{(R-C_2)^2}{W_2^2}} * e^{-\frac{r^2}{H_2^2}} + N_3 * e^{-\frac{(R-C_3)^2}{W_3^2}} * e^{-\frac{r^2}{H_3^2}}$$

$$N(R > 6.1Rj) = N_4 * e^{-\frac{(R-C_4)^2}{W_4^2}} * e^{-\frac{r^2}{H_4^2}}$$

Dove i parametri H_i rappresentano le altezze di scala dell'i-esima regione del toro, e le regioni del toro seguono la stessa numerazione di cui sopra, coerente con la loro disposizione in **TAB.1**.

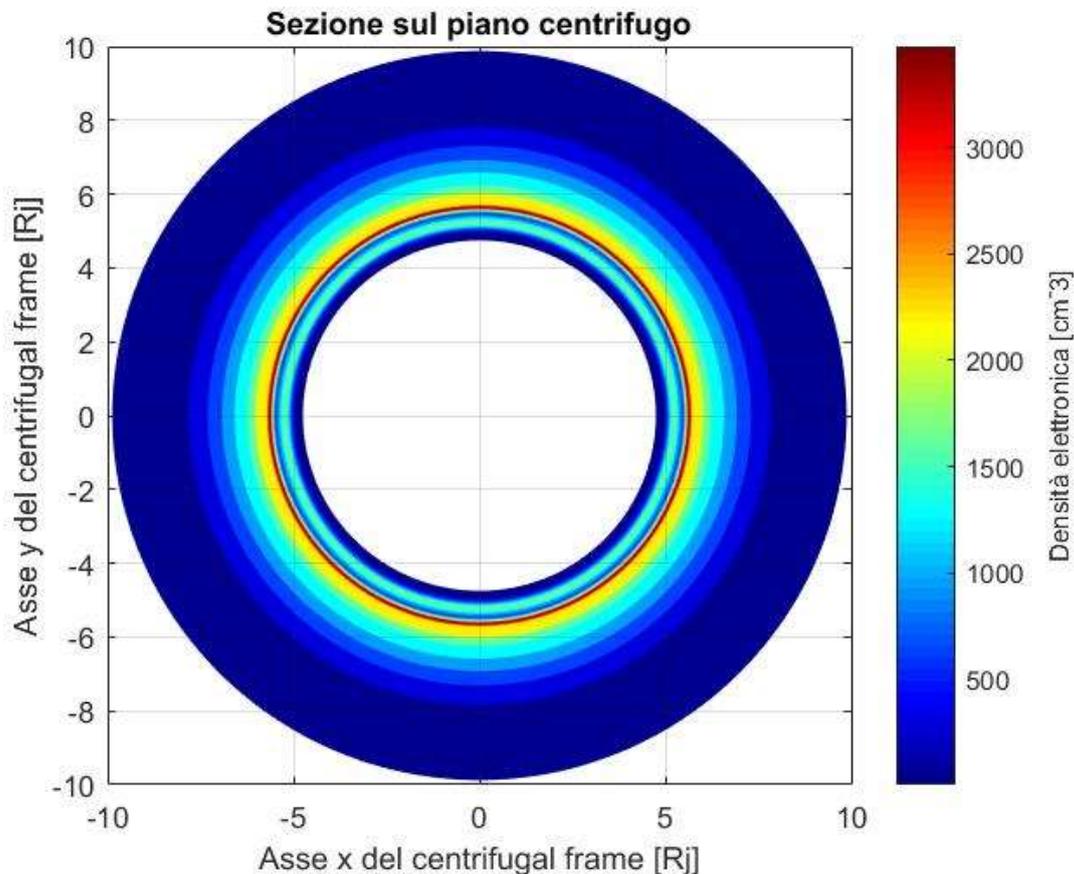


Figura 7: Riproduzione del toro sezionato usando il piano centrifugo. Come spiega la barra di colori sulla destra i toni più caldi fanno riferimento ad una più alta densità elettronica

Il modo più efficace per rendere la tridimensionalità del toro è realizzare una coppia di grafici contour, di cui uno ne rappresenti una sezione normale al piano centrifugo, ed un secondo una vista dall'alto sul piano centrifugo (figura 7 e figura 8).

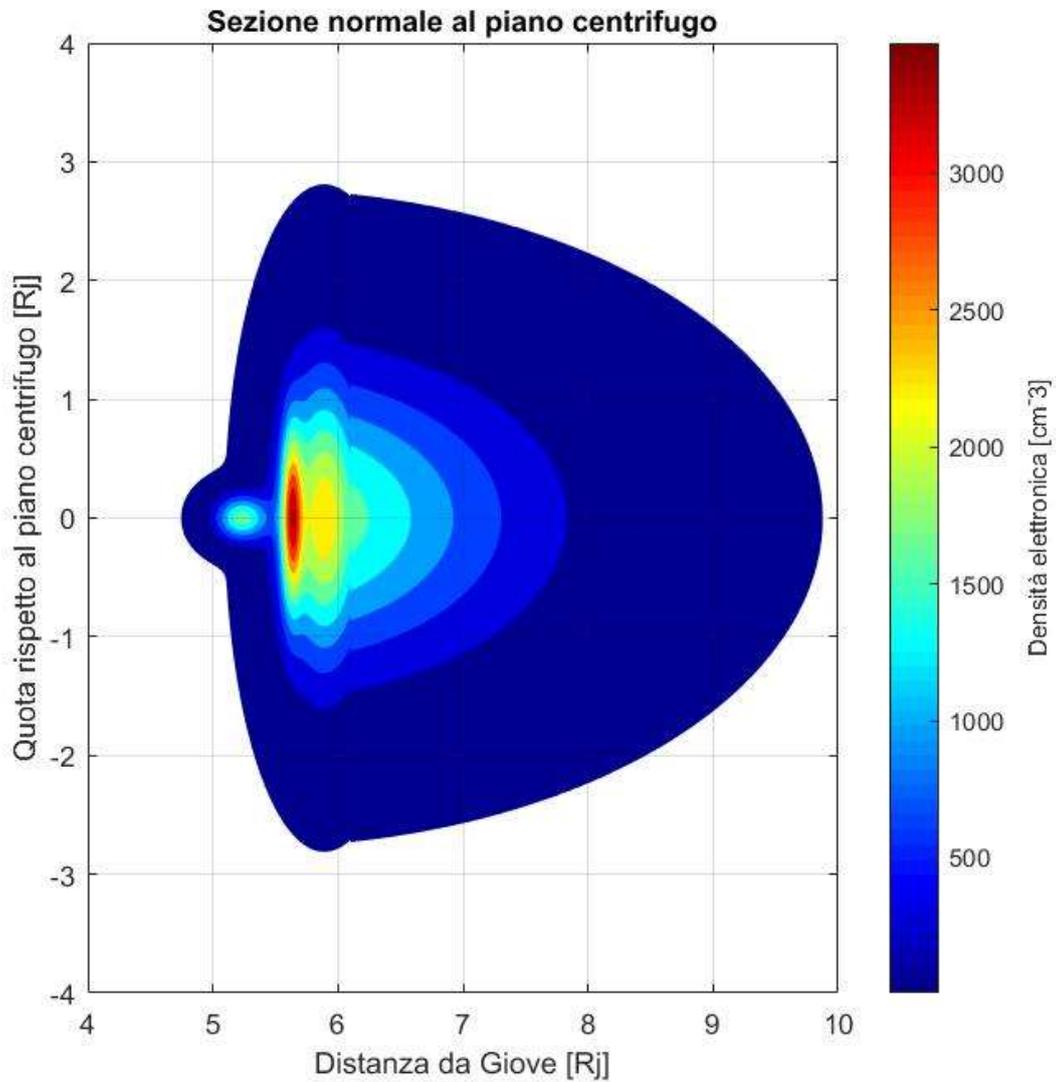


Figura 8: Sezione normale al piano centrifugo di toro di Io; anche qui è stata utilizzata la medesima gamma di colori per indicare la densità elettronica locale.

3. Algoritmo per l'individuazione delle opportunità di occultazione

Avendo per scopo quello di calcolare le opportunità di occultazione che occorrono nell'arco della science phase di una missione interplanetaria la definizione di una funzione di densità elettronica nello spazio è solo il punto di partenza nella realizzazione di un più complesso algoritmo che sfrutta il software di lavoro matriciale MATLAB e il toolkit SPICE, distribuito dal NAIF (Navigation and Ancillary Information Facility) del JPL nella sua versione in linguaggio MATLAB: MICE.

SPICE è un sistema di informazione utilizzabile per la pianificazione e l'osservazione di operazioni e movimenti compiuti da oggetti spaziali, che permette di affrontare problemi di tipo geometrico all'interno del nostro sistema solare. Le librerie di SPICE permettono di leggere delle banche di dati, files chiamati kernels, che al loro interno contengono informazioni su posizione e velocità di sonde, satelliti e pianeti nel tempo, informazioni sull'orientazione di più o meno convenzionali sistemi di riferimento, riferimenti temporali utili per scandire fenomeni al passare dei giorni, e così via. Su MATLAB è poi possibile interfacciarsi con questi dati, dopo averli letti dai vari kernels, visualizzarli, analizzarli, interpretarli ed effettuare calcoli più o meno complessi a partire da questi.

Il problema dell'individuazione delle opportunità di occultazione operate dal toro di Io sulle comunicazioni Terra-sonda, di qualunque missione e dunque sonda si stia parlando, è un problema fortemente geometrico, dove si richiede di conoscere istante per istante la posizione della Terra, quella della sonda, la congiungente tra le due (immaginando che le comunicazioni viaggino in linea perfettamente retta), e la posizione della congiungente in uno spazio contenente elettroni secondo il modello di densità elettronica del toro costruito sopra.

Dopo alcuni passi preliminari su MICE per avere accesso ai dati necessari al problema, lo script realizzato si compone di quattro parti:

- 1) Una funzione calcNe capace di calcolare la densità elettronica locale in un qualunque punto dello spazio ricevendo in input appunto un vettore posizione.
- 2) Una funzione calcTEC capace di calcolare il contenuto totale di elettroni integrando sulla congiungente Terra-sonda la densità elettronica locale in ogni punto, avendo ricevuto in input due vettori (posizioni di Terra e sonda in un certo istante).
- 3) Uno script generale che, dopo aver caricato i kernels opportuni, attraverso un ciclo for nel tempo, sia in grado di valutare il profilo di TEC per un certo intervallo di missione, e il corrispondente path delay e frequency shift istante per istante.
- 4) Un ultimo script che faccia un grafico dei risultati ottenuti mostrando profili nel tempo e traiettoria della sonda.

3.1 MICE: caricamento dei kernels e costruzione del centrifugal frame

Senza scendere troppo nel dettaglio di come funzionino e si classificano i diversi kernels di SPICE, è importante ricordare che esistono tante diverse tipologie di banche dati, denotate da diverse sigle, e più di una di queste è necessaria per affrontare un problema geometrico nello spazio, anche banale. I

kernels sono distribuiti sempre da NAIF, e se ne possono trovare in gran numero, frequentemente aggiornati.

Kernels Nel nostro caso i kernels necessari alla risoluzione del problema sono i seguenti:

- Kernels binari (*spk*) contenenti le effemeridi⁹ dei pianeti del sistema solare, della sonda Juno od Europa Clipper, e dei satelliti del sistema gioviano.
- Un kernel *pck* binario contenente informazioni sui sistemi di riferimento convenzionali.
- Un kernel *lsk* contenente un riferimento temporale con il quale poter convertire una data fornita in input in una quantità temporale numerica rispetto ad un istante zero di partenza. Questo kernel è fondamentale per poter inserire in una linea di valori successivi delle date sul calendario attraverso il comando *cspice_str2et* di MICE. Di seguito è riportata la struttura di una riga di codice che esegua questo comando.

```
%Istante iniziale dal quale cominciare a rilevare occultazioni:  
et_iniziale=cspice_str2et('Data e ora qualsiasi');  
%Istante finale al quale terminare la rilevazione:  
et_finale=cspice_str2et('Data e ora qualsiasi');
```

- Un kernel *fk*, sempre relativo ad un sistema di riferimento, ma questo volta non convenzionale: si tratta di un riferimento costruito ad hoc per questo problema e che riproduce il *centrifugal frame*.

Centrifugal Frame La funzione di densità elettronica definita per ricreare attraverso un modello matematico sofisticato il toro di Io è una funzione che associa a un dato punto dello spazio un certo valore di contenuto elettronico in [cm^{-3}]. L'assialsimmetria del toro (ipotesi semplificativa) ha permesso di definire univocamente la densità elettronica in un punto dello spazio come funzione di distanza sul piano centrifugo dal centro di Giove (R) e quota sul piano centrifugo (r), dunque il modo più semplice per scrivere la funzione calcNe è scriverla in un riferimento di questo tipo. Localizzando i punti dello spazio usando un riferimento che abbia come asse z un asse normale al piano centrifugo, e come piano xy il piano centrifugo stesso, si ha, secondo le notazioni di cui sopra:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$r = z$$

di qui immediato calcolare R ed r da un vettore (x,y,z) di input, e altrettanto immediato, con la formula della densità elettronica di cui sopra, trovare il valore di densità elettronica locale. Una scelta intelligente del riferimento dove lavorare rende la scrittura della funzione calcNe già facilmente intuibile e semplice.

Per costruire un kernel relativo al centrifugal frame è necessario creare un particolare documento di testo secondo le regole di stesura e formattazione di un *text kernel file* su SPICE [NAIF, 2019].

Tra i kernels convenzionali vi sono anche quelli relativi a sistemi di riferimento comuni, come il riferimento IAU_JUPITER, completamente solidale con Giove nella rotazione e centrato nel suo baricentro, con piano xy coincidente con il piano equatoriale del pianeta [Bagenal, 2016]. Il centrifugal

⁹ Informazioni relative a posizione e velocità di un qualunque corpo nello spazio, da un pianeta, al Sole stesso, fino ad una sonda.

frame è rotante con Giove e conserva rispetto ad esso un'orientazione fissa [Phipps, 2017]; per questo si può creare quello che su SPICE viene definito un *TK frame*, o *fixed offset frame*, ovvero un sistema di riferimento definito da una costante orientazione relativa ad un altro riferimento noto, che SPICE definisce “*relative*”. Notoriamente una qualunque rotazione da un sistema di riferimento ad un altro può essere descritta combinando tre rotazioni elementari attorno ad assi differenti, ed è proprio con una terna ordinata di rotazioni che è possibile raccordare IAU_JUPITER e il riferimento in costruzione, chiamato JUPITER_CENTRIFUGAL.

Tra le modalità di definizione di un TK frame si può utilizzare la voce ‘ANGLES’, con la quale l’input richiesto per la determinazione del riferimento sarà un insieme di tre angoli ordinati con gli annessi assi di riferimento attorno ai quali debbano avere luogo le successive rotazioni. Per convenzione SPICE richiede un preciso formato di input per angoli ed assi:

$$M = [angle_1]_{axis_1} [angle_2]_{axis_2} [angle_3]_{axis_3}$$

Dove M è una matrice che converte vettori nel riferimento in costruzione (JUPITER_CENTRIFUGAL) in vettori nel riferimento *relative* (IAU_JUPITER).

Graficamente il piano del riferimento magnetico e il piano dell’equatore sono inclinati l’uno rispetto all’altro, ed hanno una linea dei nodi di intersezione a longitudine 69.4 gradi nel sistema IAU_JUPITER; l’asse z del riferimento magnetico è inclinato nella stessa direzione di quello normale al piano centrifugo rispetto all’asse z normale al piano equatoriale di Giove [Bagenal, 2016]. L’inclinazione dell’asse z del riferimento centrifugo rispetto all’asse z del riferimento solidale a Giove è di 6.4 gradi verso longitudine 159.2 gradi, invece che 9.6 gradi come nel caso del riferimento magnetico [Bagenal, 2006]. Ciò vuol dire che se l’asse x coincide con la linea dei nodi in JUPITER_CENTRIFUGAL si dovrà prima effettuare una rotazione di 6.4 gradi dell’asse z intorno al primo asse, poi una rotazione di -69.2 gradi rispetto al terzo asse. La terza rotazione sarà di zero gradi, e l’asse rispetto al quale farla sarà indifferente: la matrice associata alla terza rotazione elementare sarà sempre l’identità.

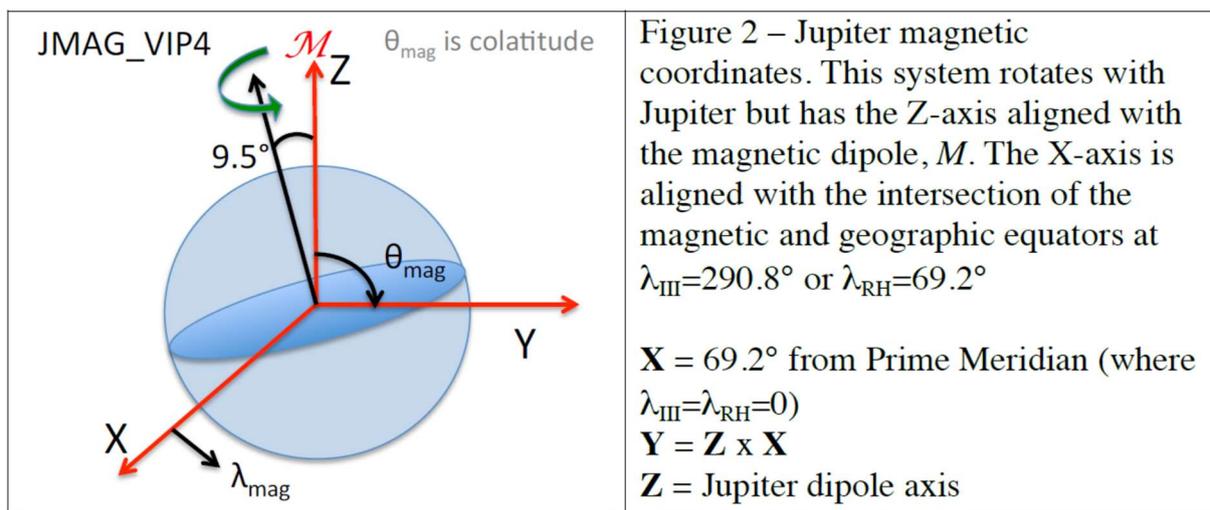


Figura 9: Riferimento magnetico (in rosso) e sua orientazione reciproca rispetto a IAU_JUPITER (in nero). IAU_JUPITER è levogiro, dunque la longitudine in esso è indicata dalla notazione λ_{RH} [Bagenal, 2006].

Di seguito il testo del kernel contenente il riferimento centrifugo JUPITER_CENTRIFUGAL:

```
KPL/FK
```

```
\begindata
```

```
FRAME_JUPITER_CENTRIFUGAL = 1599004
```

```
FRAME_1599004_NAME = 'JUPITER_CENTRIFUGAL'
```

```
FRAME_1599004_CLASS = 4
```

```
FRAME_1599004_CLASS_ID = 1599004
```

```
FRAME_1599004_CENTER = 599
```

```
TKFRAME_1599004_RELATIVE = 'IAU_JUPITER'
```

```
TKFRAME_1599004_SPEC = 'ANGLES'
```

```
TKFRAME_1599004_ANGLES = ( 0 , -69.2 , 6.4 )
```

```
TKFRAME_1599004_AXES = ( 2 , 3 , 1 )
```

```
TKFRAME_1599004_UNITS = 'DEGREES'
```

```
\begintext
```

3.2 Funzione di densità elettronica calcNe

La funzione calcNe è creata per ricevere in input un vettore colonna a tre elementi, restituendo uno scalare corrispondente alla densità elettronica in quel punto. Dal momento che lo script dovrà lavorare non su un singolo punto, ma su punti diversi di diverse congiungenti Terra-sonda per le diverse posizioni assunte da Terra e sonda in successivi istanti di tempo, la funzione è “vettorizzata”. Ciò significa che in input può ricevere anche più vettori colonna 3x1, dunque una matrice 3xn con n numero di vettori su cui la funzione lavorerà distintamente. L’output sarà in questo caso un vettore riga 1xn con i valori di densità elettronica locale degli n vettori dati in pasto alla funzione.

Ogni vettore colonna elaborato da calcNe, espresso in coordinate cartesiane nel JUPITER_CENTRIFUGAL, sarà subito scomposto in coordinate cilindriche R, distanza dal centro di Giove sul piano

centrifugo, e r, quota sul piano centrifugo (l'angolo di longitudine è superfluo per assialsimmetria), per essere poi introdotto nell'espressione della densità elettronica valida per R minore o maggiore di 6.1 raggi gioviani a seconda della posizione considerata.

Intuitivamente questa scrittura può riassumere la funzione:

$$Ne(R, r) = calcNe(\vec{P})$$

Dove \vec{P} è un vettore nel riferimento JUPITER_CENTIRFUGAL, e Ne ha come unità di misura [cm^{-3}].

3.3 Funzione di integrazione lungo la linea di vista calcTEC

La funzione calcTEC è pensata per lavorare in un solo istante di tempo, ricevendo in input la posizione della sonda e della Terra nel riferimento centrifugo, e restituendo il valore scalare di totale contenuto di elettroni [m^{-2}] lungo la congiungente, o *line of sight* tra i due corpi.

I passaggi da effettuare sono quindi due:

- 1) L'individuazione della congiungente e di una coordinata intrinseca su di essa lungo la quale sia possibile integrare.
- 2) L'utilizzo di una funzione di matlab per il calcolo di integrali numerici che svolga il l'integrale di calcNe valutato sui punti della congiungente.

Congiungente Terra-sonda Assegnati \vec{P}_{sc} e \vec{P}_E come vettori posizione della sonda e della Terra rispettivamente il vettore congiungente i due punti si trova per differenza:

$$\vec{C} = \vec{P}_E - \vec{P}_{sc}$$

\vec{C} è il vettore che dalla sonda punta verso la Terra, e un qualunque suo punto si può esprimere come la posizione della sonda più una certa frazione di congiungente:

$$\vec{R}(s) = \vec{P}_{sc} + s * (\vec{P}_E - \vec{P}_{sc})$$

Con R generico punto della linea di vista, ed s quantità compresa tra 0 e 1. Ovviamente quando s=0 $\vec{R} = \vec{P}_{sc}$, e quando s=1 $\vec{R} = \vec{P}_E$. La coordinata s è una quantità che aumenta procedendo lungo la congiungente, una coordinata che indica in quale punto della linea di vista ci si trovi, dunque una coordinata intrinseca.

Integrazione Per calcolare la TEC bisogna effettuare un integrale di linea lungo la linea di vista; la forma generalizzata per esprimere questa operazione matematica è la seguente:

$$TEC = \int_{\vec{P}_{sc}}^{\vec{P}_E} Ne(\vec{R})d\vec{R}$$

Con $d\vec{R}$ si intende un punto lungo la congiungente, o la parte di congiungente individuata da un certo vettore \vec{R} ; il segno di vettore aiuta a pensare al significato della formula, e al fatto che per muoversi

lungo la congiungente per ora si stia seguendo il movimento di un vettore posizione \vec{R} scaturente dal centro di Giove, ma in realtà la coordinata di integrazione dell'integrale di linea è uno scalare. Effettuando un cambio di coordinate, invece che al variare di \vec{R} lungo la congiungente l'integrazione muoverà lungo la linea di vista al variare di s .

$$\vec{R} = \vec{P}_{Sc} \Rightarrow s = 0$$

$$\vec{R} = \vec{P}_E \Rightarrow s = 1$$

E stando alla definizione di $\overline{R(s)}$ si può ottenere anche il passaggio da $d\vec{R}$ in ds :

$$\frac{dR(s)}{ds} = \|\vec{P}_E - \vec{P}_{Sc}\|$$

$$dR(s) = \|\vec{P}_E - \vec{P}_{Sc}\| ds$$

L'eliminazione della notazione di vettore non è una dimenticanza, bensì una conseguenza del significato di coordinata di integrazione in un integrale di linea, cui si è accennato poco sopra.

L'espressione del contenuto totale di elettroni diventa dunque:

$$TEC = \|\vec{P}_E - \vec{P}_{Sc}\| \int_0^1 Ne(s) ds$$

E su MATLAB la funzione utilizzata per calcolare l'integrale numerico è la funzione "trapz", la quale discretizza il problema di integrazione valutando l'area sottesa dalla funzione $Ne(s)$ come somma di un numero finito di trapezi. La discretizzazione è fine a piacere, si può inizializzare un vettore di valori di s con passo più o meno breve: in questo caso si è usato 10^{-6} .

Alleggerimento dell'integrale Un accorgimento doveroso per velocizzare l'esecuzione di una funzione di integrazione è di ridurre, se possibile, gli estremi di integrazione. Facendo qualche esperimento con la funzione calcNe si vede come con ottima approssimazione la densità elettronica locale oltre i $20R_j$ dal centro di Giove sia nulla. Riprendendo l'espressione di $\overline{R(s)}$ e imponendo

$$\|\overline{R(s)}\| = 20R_j$$

Si può trovare per una coppia di \vec{P}_{Sc} e \vec{P}_E una coppia di valori s_1 ed s_2 , tali per cui $\overline{R(s_{1,2})}$ sono le intersezioni tra la direzione della congiungente Terra-sonda e una sfera virtuale di raggio $20R_j$ centrata nel centro di Giove. Chiamato s_{max} il nuovo estremo di integrazione insieme allo 0, se s_1 e s_2 sono complesse coniugate la congiungente non interseca mai la sfera, e $s_{max} = 0$ (non serve integrare, la TEC sarà nulla). Se la prima delle due fosse negativa e la seconda positiva vorrebbe dire che la sonda è all'interno della sfera, s_{max} sarà la soluzione positiva delle due, dunque la maggiore. Se entrambe dovessero essere negative la sonda si troverebbe fuori dalla sfera, e la congiungente la intersecherebbe alle sue spalle rispetto alla Terra, $s_{max} = 0$. Qualora entrambi i valori di s fossero positivi la sonda avrebbe una congiungente con la Terra intersecante la sfera in due punti, s_{max} dovrà essere il maggiore dei due per evitare di bloccare l'integrazione prima ancora di essere entrati nella sfera.

In conclusione:

$$TEC(\vec{P}_{Sc}, \vec{P}_E) = \|\vec{P}_E - \vec{P}_{Sc}\| \int_0^{s_{max}} Ne(s) ds$$

3.4 Script per il calcolo del frequency shift

Lo script generale per il calcolo dei profili di TEC, path delay e frequency shift utilizza le funzioni calcNe e calcTEC per valutare ciò che accade in una finestra di tempo della missione di interesse. Lo shift di frequenza è stato calcolato usando un link one way¹⁰ *spacecraft-to-Earth* e non si sono usati parametri correttivi del tempo luce (*light time*), ovvero non si è tenuto conto dello spostamento della sonda e della Terra durante il viaggio del segnale da trasmettitore a ricevitore. La specifica data in input al comando *cspice_spkezzr* per il tempo luce è stata dunque ‘NONE’.

Path delay La presenza di uno sfasamento nella frequenza delle trasmissioni è quanto a Terra viene misurato per rilevare l’occorrere di un’occultazione, ma il primo effetto che una quantità di elettroni sulla linea di vista genera nel segnale è in realtà un altro, ovviamente legato poi al frequency shift: si tratta del path delay. Un’onda elettromagnetica che attraversa un ambiente non vuoto incorre in una serie di fenomeni di rifrazione e diffrazione responsabili di un certo ritardo dell’arrivo della trasmissione al destinatario; questo ritardo moltiplicato per la velocità della luce diventa una lunghezza, la lunghezza in più rispetto alla distanza tra mittente e destinatario che il segnale avrebbe percorso se si fosse mosso in linea retta con velocità costante nel tempo effettivamente impiegato. Questa lunghezza è chiamata path delay [Casajus, 2019]. Un path delay negativo denota un anticipo nell’arrivo del segnale, ed è proprio un anticipo quello prodotto dal toro sulle comunicazioni tra Juno/Europa Clipper e la Terra. Chiarito ciò gli output dello script saranno vettori riga di TEC, path delay e frequency shift in diversi istanti tempo della missione [Casajus, 2019].

Dopo il caricamento dei kernels utili con il comando *cspice_furnsh* e la conversione delle date di inizio e fine analisi in quantità numeriche con *cspice_str2et*, si crea un vettore di istanti che vanno da quello iniziale a quello finale con un passo definito a piacere (il passo più preciso utilizzato all’interno dell’elaborato è di 60 secondi). Attraverso un ciclo for si analizza quanto accade istante per istante alla sonda e alla Terra con il comando *cspice_spkezzr*, strumento che permette di prelevare informazioni dai kernels portandole su MATLAB e aggiungere specifiche sui dati che si vogliono ottenere [NAIF, 2019].

```
%Con cspice_spkezzr si ottiene un doppio risultato, il vettore "state" è un
vettore 6x1 contenente tre coordinate di posizione e tre componenti di velocità
del corpo richiesto, mentre ltime è uno scalare relativo al tempo luce.

[state, ltime] = cspice_spkezzr('ID del corpo di interesse',t,'FRAME rispetto al
quale se ne vogliono i dati','Parametro correttivo del tempo luce','Corpo os-
servatore');

%
```

Conosciute posizione della Terra e della sonda ad un generico tempo \bar{t} con calcTEC si può valutare la TEC(\bar{t}), e da essa il path delay utilizzando la formula che lo lega al contenuto totale di elettroni sulla linea di vista.

$$\Delta l(\bar{t}) = \frac{-40.3 * 10^6 * TEC(\bar{t}) * 10^{-4}}{f_{Tx}^2}$$

Dove $-40.3 * 10^6$ è una costante in $[cm^3/s^2]$, e la TEC in $[m^{-2}]$ è moltiplicata per 10^{-4} per convertirla in $[cm^{-2}]$. f_{Tx} è la frequenza di trasmissione in downlink della sonda, e vale 8.404 GHz sia per Juno che per Europa Clipper [Casajus, 2019]. Il path delay così ottenuto è in [cm].

¹⁰ Si è tenuto conto di un solo viaggio di andata del segnale dalla sonda verso la Terra, non del suo ritorno alla sonda.

Il ciclo for permette di calcolare TEC e path delay in ogni istante di tempo contenuto nel vettore dei tempi, inserendone a loro volta il valore in due nuovi vettori inizializzati prima del ciclo con lunghezza uguale a quella del vettore dei tempi.

Frequency shift La variazione del path delay nel tempo è legata al frequency shift dalla velocità della luce, dunque con un'operazione di derivazione e una di moltiplicazione per un fattore dipendente dalla velocità della luce è possibile passare da path delay a frequency shift. La formula che lega le due grandezze è la seguente:

$$\Delta f(\bar{t}) = \frac{d\Delta l(\bar{t})}{dt} * \frac{f_{Tx}}{c}$$

Dove $\Delta f(\bar{t})$ è il frequency shift in [Hz] ad un dato istante \bar{t} , e $c = 2.9979 * 10^{10}$ è la velocità della luce nel vuoto in [cm/s] [Casajus, 2019]. Su MATLAB per effettuare la derivazione si è utilizzata la funzione “diff” a numeratore e denominatore, ed essendo Δl un vettore riga anche Δf sarà un vettore riga con lunghezza uguale a quella del vettore dei tempi meno uno¹¹.

```

%=== FREQUENCY SHIFT ===%

%Calcolo del frequency shift con modello aggiornato; il punto nella divisione
serve perché stiamo lavorando con dei vettori riga, e vogliamo che l'opera-
zione sia effettuata elemento per elemento (element-wise)

Df = (diff(Dl) ./ diff(time)) * (fTx / (c * 10^5));           % [Hz]

%=====

```

Sempre all'interno dello script è opportuno specificare un valore di soglia di frequency shift per poter giudicare in quali istanti il segnale possa definirsi occultato e quando non: nell'elaborato è stato scelto un valore piuttosto basso di $2 * 10^{-4} Hz$, considerando che i picchi più alti di frequency shift su Juno ed Europa Cipper si aggirano intorno ai $4 * 10^{-3} Hz$.

Attraverso un ciclo for lo script valuta il valore assoluto del vettore Δf elemento per elemento, e salva tutte le quantità superiori alla soglia. In un secondo momento calcola i tempi dei diversi valori di frequency shift superiori al valore limite, e quando trova un intervallo tra un istante e il successivo superiore alle 2.30h notifica la fine di un'occultazione e l'inizio della successiva. Non sono tra gli output principali ma con il nome “date_inizio”, “date_fine” e “durate” sono presenti variabili in uscita con date di inizio e fine occultazione, con annesse durate.

3.5 Grafici di profili e traiettoria

Il secondo script utilizza dati provenienti dal primo, e sulla stessa finestra temporale nella quale ha lavorato il primo script disegna sei grafici totali, di cui tre relativi a TEC, path delay e frequency shift, e tre relativi alla traiettoria della sonda.

I primi tre grafici riportano sulle ordinate i valori della grandezza caratteristica, la TEC ad esempio, con annessa unità di misura, e sulle ascisse il tempo in forma di data (YYYY-MM-DD, HR:MN). Fa

¹¹ In MATLAB diff effettua la differenza tra elementi successivi all'interno del vettore di input, restituendo un vettore con un elemento in meno (in posizione uno nel vettore di output ci sarà la differenza tra l'elemento 2 e l'elemento 1 del vettore di input, e così via).

eccezione il grafico del frequency shift, dove a sinistra sull'asse y sono riportati i valori di Δf in Hz, mentre a destra viene riportato il corrispondente valore di doppler shift in mm/s.

$$\Delta s = \frac{\Delta f * c}{f_{Tx}}$$

dove Δs è il doppler shift corrispondente ad un certo valore di frequency shift Δf .

I secondi tre grafici riproducono la traiettoria della sonda e la posizione del centro di Giove, prima proiettata sul suo piano equatoriale, poi proiettata su un piano normale ad esso, e infine nelle tre dimensioni rispetto ad un riferimento con piano xy coincidente con il piano equatoriale.

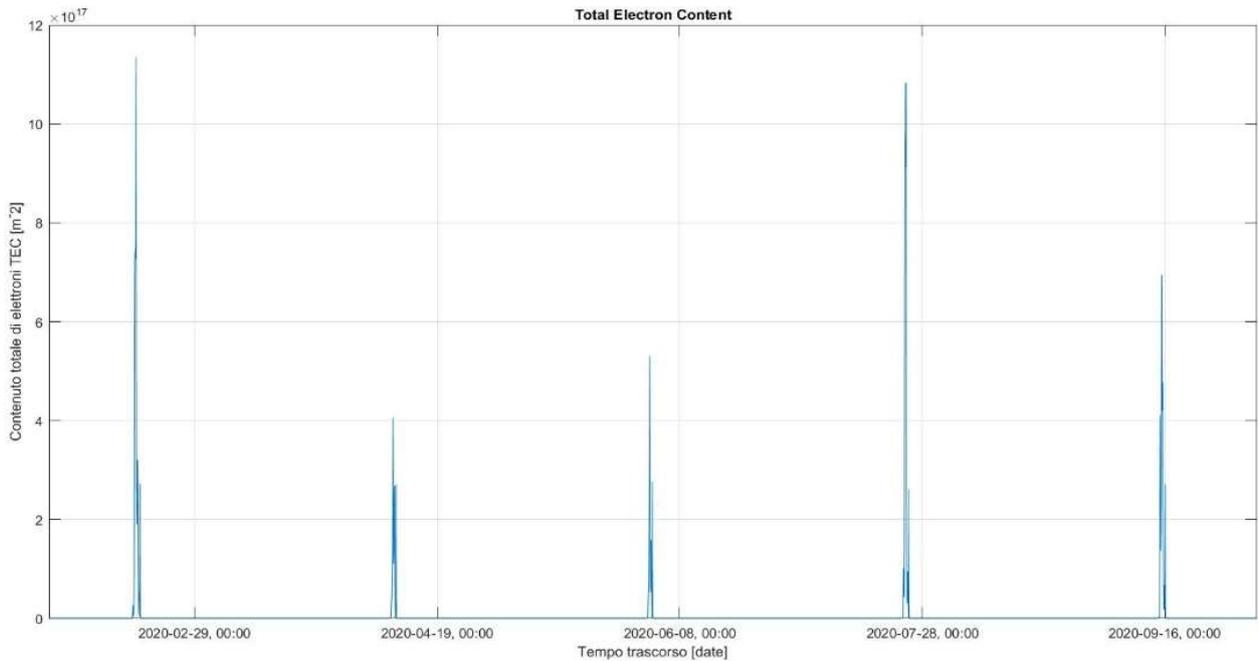


Figura 10.1: Andamento del totale contenuto di elettroni [m^{-2}] al trascorrere del tempo [date] dal 30/01/2020 al 05/10/2020.

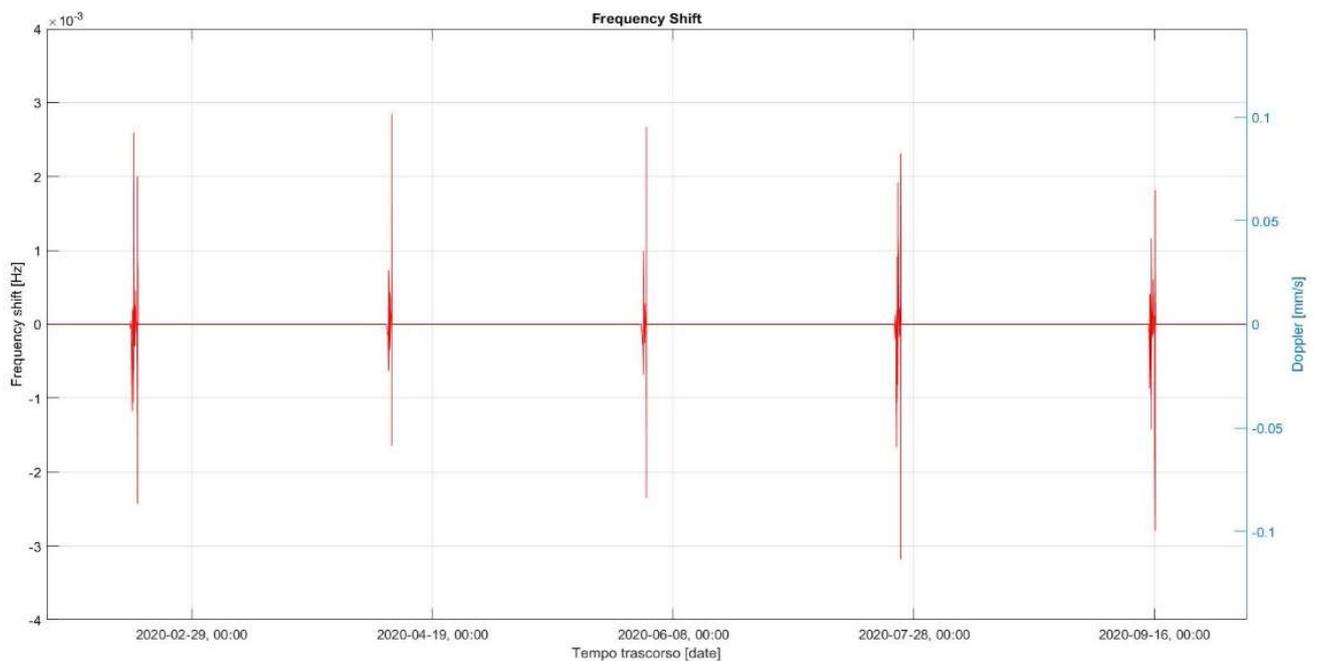


Figura 10.2: Andamento del frequency shift [Hz] al trascorrere del tempo [date] dal 30/01/2020 al 05/10/2020.

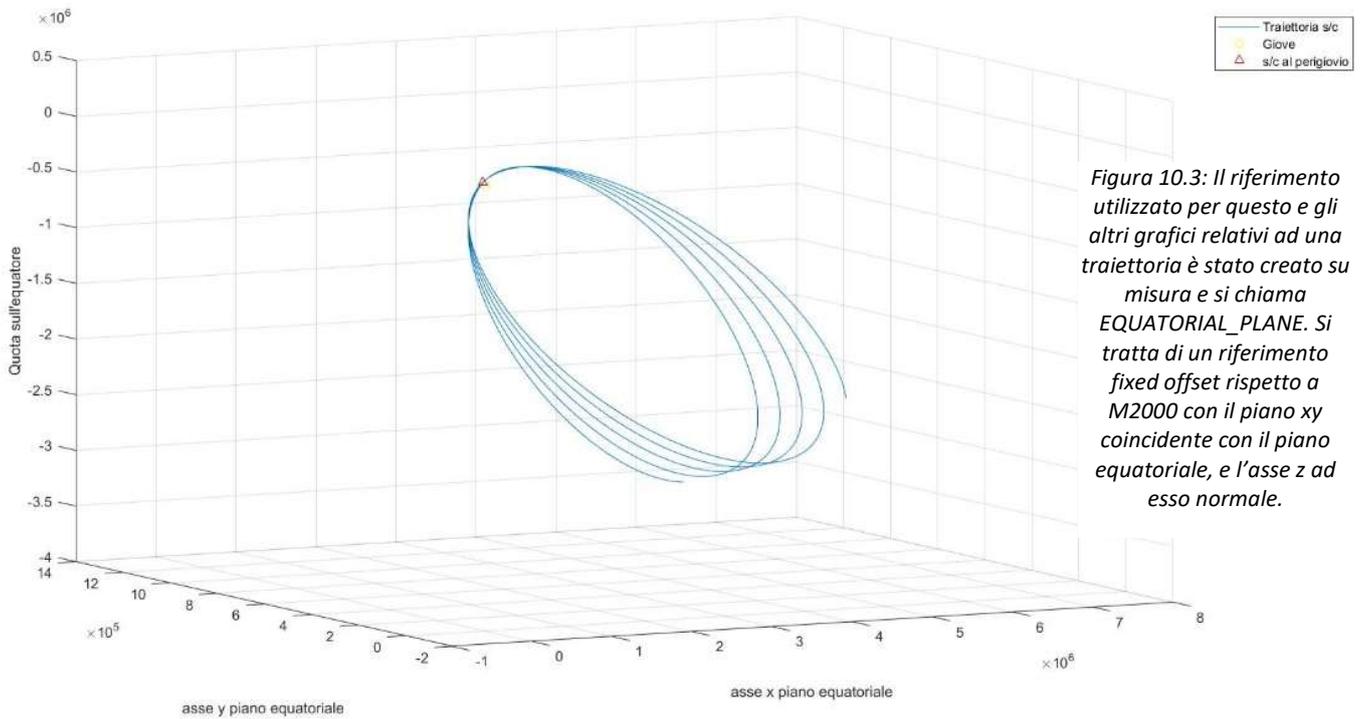


Figura 10.3: Il riferimento utilizzato per questo e gli altri grafici relativi ad una traiettoria è stato creato su misura e si chiama EQUATORIAL_PLANE. Si tratta di un riferimento fixed offset rispetto a M2000 con il piano xy coincidente con il piano equatoriale, e l'asse z ad esso normale.

Figura 10: Esempio di grafici di TEC (10.1), frequency shift (10.2) e traiettoria tridimensionale (10.3) relativi alla missione Juno e ad un intervallo di tempo che va dal 30 gennaio al 5 ottobre 2020.

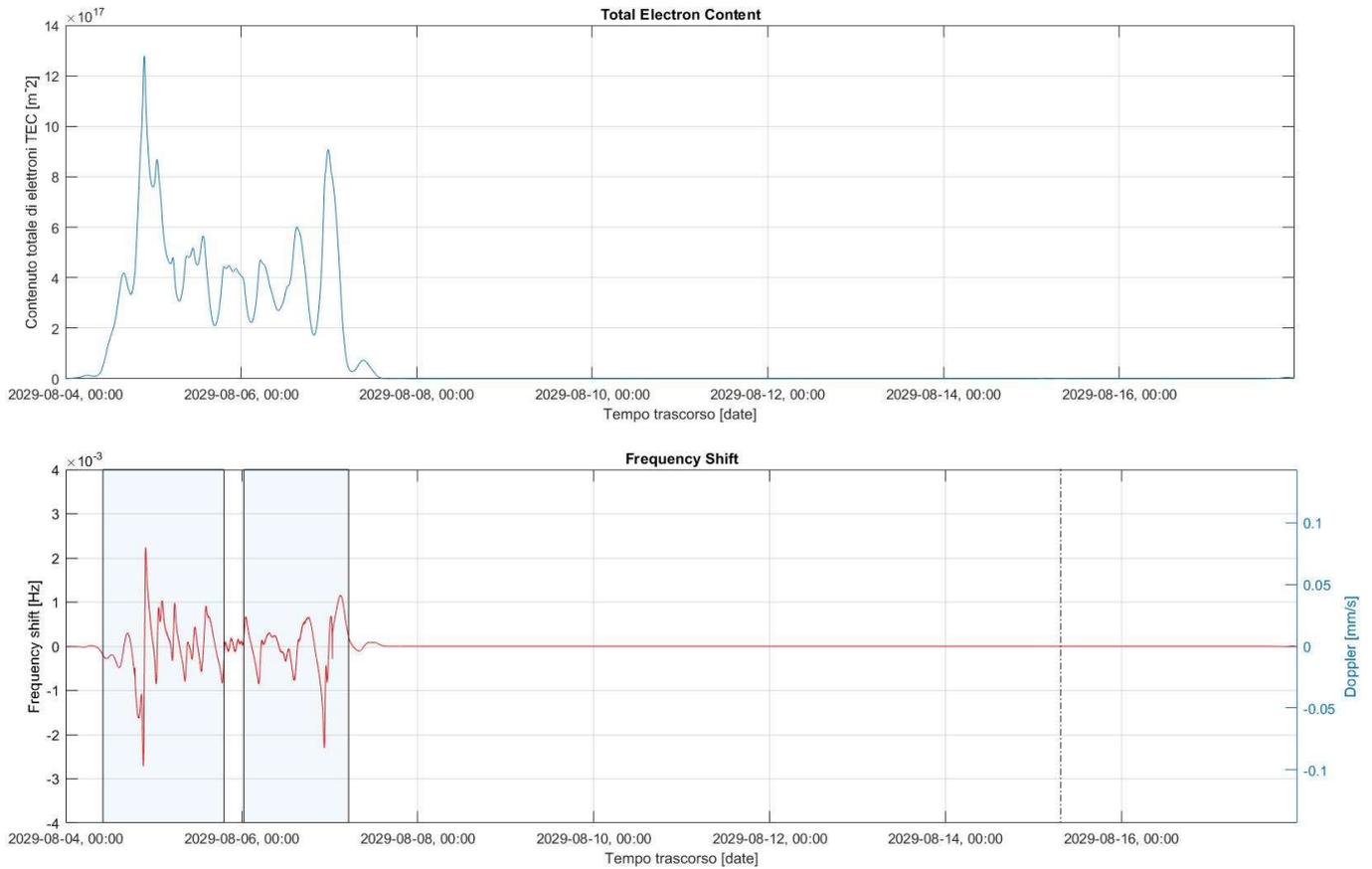


Figura 11: Profilo di TEC (in alto) e frequency shift (in basso) relativo alla missione Europa Clipper tra il 4 agosto 2029 e il 18 agosto 2029.

4. Missione Juno

La missione Juno è la seconda missione del programma spaziale *New Frontiers* della Nasa dopo il lancio della sonda interplanetaria *New Horizons*, e la prima sonda ad operare nel sistema solare esterno sfruttando energia solare. Il lancio è avvenuto al Cape Canaveral Air Force Station il 5 agosto 2011, con un flyby della Terra nel 9 ottobre 2013. A valle di una lunga fase di avvicinamento a Giove, la sonda è entrata in orbita intorno al gigante gassoso il 5 luglio 2016 cominciando una science phase destinata a terminare il 30 luglio 2021, almeno secondo quanto pianificato [Bolton, 2017].

Juno è classificata come missione PI_led¹², con il Jet Propulsion Laboratory come management partner, e la Lockheed Martin come fornitrice dei componenti costruttivi. La sonda, rotante con una velocità di 2 giri al minuto, ha una massa di 3625 kg e si compone di tre file di pannelli solari lunghe 9 metri disposte a 120 gradi l'una dall'altra, che forniscono circa 500 Watts durante le orbite attorno a Giove (figura 12) [Bolton, 2017].

Obiettivi La missione Juno ha lo scopo di raccogliere una grande quantità di informazioni su tutto il sistema gioviano. Tra gli aspetti di maggior interesse vi è il processo di formazione del gigante gassoso, dunque la sua origine, la presenza o meno di un nucleo roccioso o comunque solido nel cuore di Giove, il rapporto tra ossigeno e idrogeno all'interno dell'atmosfera; domande le cui risposte permetteranno di mappare con maggior certezza la struttura interna del pianeta, e alle quali si programma di arrivare con misurazioni dei campi magnetico e gravitazionale [Bolton, 2010]. La dinamica dell'atmosfera gioviana, la sua profondità reale, l'intensità e i comportamenti dei suoi venti, e ancora l'evoluzione della magnetosfera del pianeta, la sua forma tridimensionale, la presenza di ioni ed elettroni nell'ambiente intorno a Giove, la struttura fortemente tempo variante e tutt'altro che assialsimmetrica del toro di Io, sono tutti aspetti che trovano nella missione Juno un'opportunità per essere approfonditi, specialmente a livello quantitativo, nell'arco di 37 orbite ellittiche quasi polari intorno al gigante gassoso, di cui 32 realmente dedicate alla raccolta di dati scientifici [Bolton, 2010].



Figura 12: Sonda Juno con zoom sulla strumentazione scientifica.

Payload

La strumentazione di cui dispone la sonda per completare la propria science phase è molto diversificata, appunto per poter investigare su Giove da tanti diversi punti di vista.

Senza scendere nel dettaglio, la JunoCam è la fotocamera montata sulla sonda, in grado di fornire immagini a tre colori del gigante gassoso e delle sue lune; gli strumenti

¹² Una *Principal-Investigator-led* mission è una missione non nata per rispondere ad un'immediata necessità scientifica, bensì alimentata dalla creatività di un team di persone provenienti da diversi enti ed ambiti [NASA SCIENCE, 2019].

UVS, Waves, JIRAM e JADE sono progettati per raccogliere informazioni sulle aurore del pianeta, mentre il JEDI è in grado di misurare il contenuto della sua magnetosfera. Gli strumenti per gli esperimenti di Gravity science hanno come obiettivo la determinazione della struttura interna di Giove, il MAG la mappatura del campo magnetico e il MWR lo studio dell'atmosfera [Bolton, 2010].

Comunicazione con la Terra Al di là del funzionamento dettagliato di ogni singolo sensore/attrezzatura, di scarso interesse per l'economia di questo elaborato, va sottolineato come tutta la sonda sfrutti un particolare sistema di comunicazione con la Terra, le cui dinamiche giocano un ruolo importante nello studio delle occultazioni operate dal toro di Io. Anziché una singola onda elettromagnetica Juno, una volta ricevuto dalla Terra un segnale radio in uplink¹³ a banda X (7.3 GHz), lo altera e risponde con un doppio segnale in downlink, uno in banda X (8.404 GHz), ed uno in banda Ka (32.083 GHz) [Phipps, 2017]. Tutte le onde in downlink arriveranno alla Terra con una traccia della densità elettronica distribuita lungo la congiungente Terra-sonda in forma di frequency shift, ma sulle due diverse frequenze di trasmissione uno stesso contenuto elettronico attraversato dal segnale inciderà in modo diverso. A destinazione è possibile combinare linearmente le due diverse frequenze di ricezione per isolare lo shift di frequenza unicamente dovuto al plasma da quello dovuto ad altre ragioni, come il normale doppler dato dalla velocità di spostamento del trasmettitore. Grazie a questa architettura di trasmissione dei segnali provenienti da Juno è possibile utilizzare il Δf dovuto al toro e ripulito da altri contributi per perfezionare la funzione di densità elettronica locale $N_e(R,r)$, e ottenere un modello di IPT sempre più vicino al reale [Phipps, 2017].

4.1 Traiettoria di Juno

Juno è stata lanciata il 5 agosto 2011 utilizzando un Atlas V 551 come vettore, e di qui ha intrapreso un lungo viaggio verso Giove che le avrebbe richiesto circa cinque anni (figura 13). Il raggiungimento del gigante gassoso ha visto l'ingresso della sonda in un'ampia orbita ellittica ed eliocentrica per circa 13 mesi, al cui afelio è stata poi eseguita una doppia "Deep space maneuver" il 30 agosto e il 14 settembre 2012 per aggiustare la traiettoria e puntare alla Terra, nel frattempo spostatasi lungo la propria orbita [Bolton, 2017]. Seguendo l'ellisse così modificata Juno ha raggiunto nuovamente la Terra 26 mesi totali dopo il lancio, il 10 ottobre 2013, per effettuarne un flyby, ovvero sfruttarne la gravità per ottenere un incremento di velocità di 3.9 km/s. Questa manovra di gravity assist è stata anche sfruttata per fare alcuni test sulla strumentazione installata sulla sonda, ma soprattutto per ridurre la spesa di carburante necessaria per avere uno slancio sufficiente a raggiungere il gigante gassoso in autonomia [Bolton, 2017]. Da questo momento Juno è stata in viaggio verso Giove entrando in orbita polare rispetto ad esso il 5 luglio 2016.

L'approccio al pianeta è stato ad una velocità superiore a quella di fuga, si può dire l'orbita fosse iperbolica, dunque una decelerazione ha fatto sì che la sonda passasse ad un'orbita ellittica con periodo di circa 53 giorni. Originariamente si era pensato di ridurre l'eccentricità dell'orbita, che in condizioni di periodo di 53 giorni ha al perigiovio una distanza dalla superficie del pianeta di circa 4200 km, ed una distanza massima all'apogiovio di $8.1 * 10^6 km$. L'azione propulsiva di riduzione di eccentricità, definita manovra di riduzione del periodo (Period Reduction Maneuver – PRM), avrebbe dovuto ridurre il periodo orbitale della sonda durante la science phase a 14 giorni, cosicché Juno completasse 37 orbite in meno di un anno e mezzo, tuttavia un problema alle valvole dell'elio del sistema propulsivo fece desistere i responsabili della missione dal seguire il programma [Bolton, 2017]. Il rischio di compromettere la missione portando la sonda in un'orbita completamente

¹³ Nella comunicazione tra Terra e sonda la linea di uplink è la linea di comunicazione con la Terra alla trasmissione e la sonda alla ricezione. Per il downlink vale il contrario.

sbagliata era troppo alto, così il 17 febbraio 2017 fu annunciato che Juno avrebbe conservato la sua orbita originale con periodo di 53 giorni, attraversando il perigio della ventiduesima orbita nel settembre 2019.

La ragione della inclinazione quasi polare (105.5 gradi) delle orbite è da ricercare proprio nella geometria tendenzialmente piatta della magnetosfera di Giove, e nella posizione del plasma del toro di Io, principale fonte di occultazione per le comunicazioni durante una missione con un perigio così vicino alla superficie del gigante gassoso [Bolton, 2017]. Rendendo le orbite polari si riduce al minimo il presentarsi di occultazioni, oltre a facilitare misurazioni ravvicinate sul pianeta.

La durata complessiva della science phase intorno a Giove è di circa cinque anni, tempo in cui il pianeta compie circa metà della propria rivoluzione intorno al Sole, e l'ascensione retta del nodo ascendente (Ω) si modifica (figura 15). Per via dell'asfericità del gigante gassoso l'argomento del perigio si sposta verso Nord di circa 1 grado per orbita (figura 16). L'apogio delle 35 orbite appare orientato sempre più verso il Sud di Giove, e una sempre maggior parte dell'orbita scende al di sotto dell'equatore gioviano [Bolton, 2017].

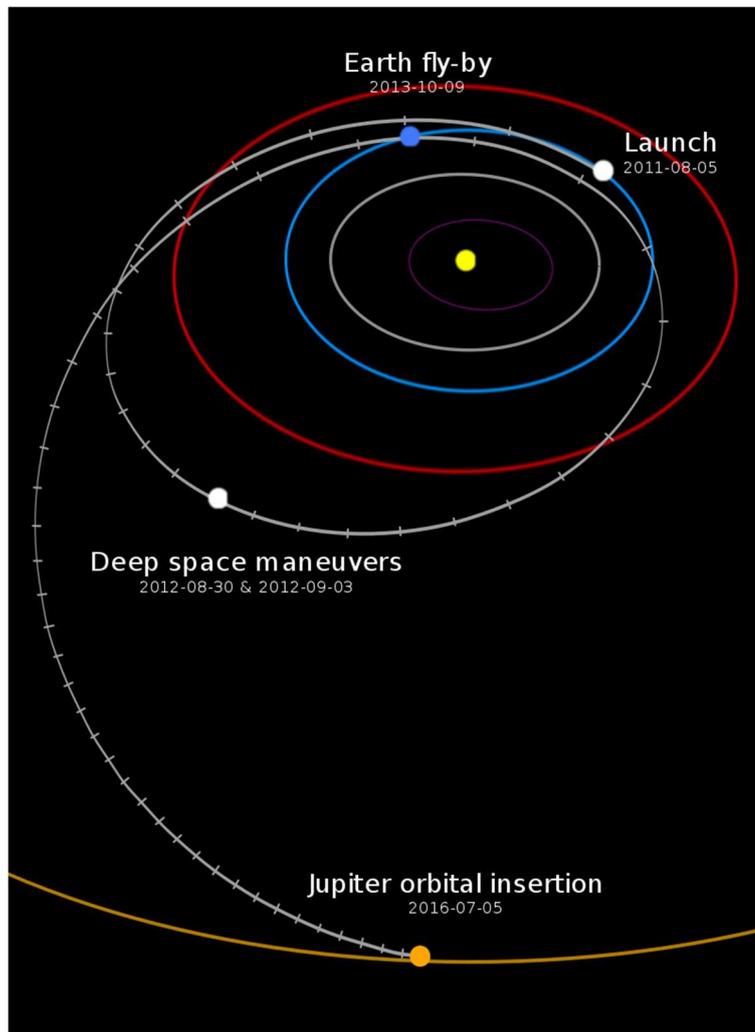


Figura 13: Traiettoria (in grigio) della fase di avvicinamento a Giove della missione Juno. In blu è rappresentata la traiettoria della Terra, in rosso quella di Marte.

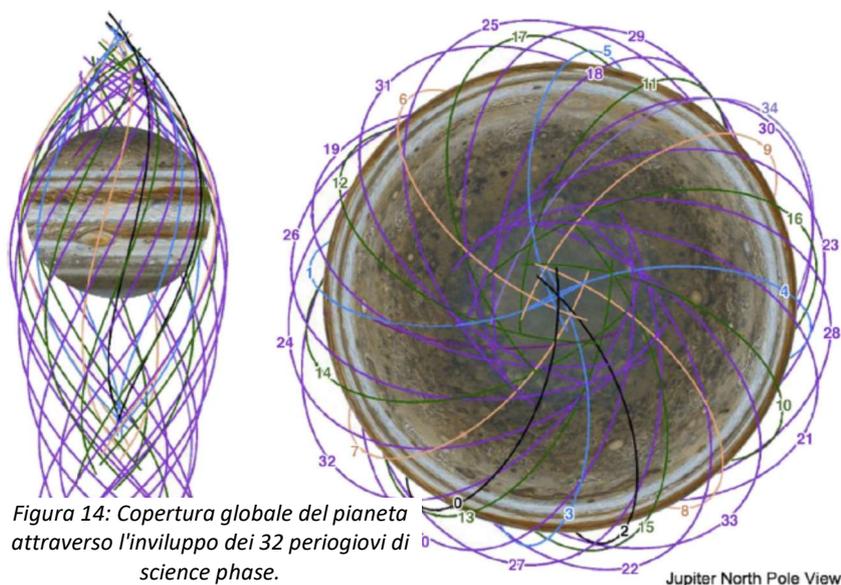


Figura 14: Copertura globale del pianeta attraverso l'involuppo dei 32 perigiovi di science phase.

I perigiovi della missione sono distribuiti in modo tale che le 32 orbite successive (1 delle 33 è "di scorta") permettano alla sonda di passare ad una longitudine specifica sempre diversa fornendo una mappatura ad alta risoluzione di tutto il pianeta, dei suoi campi magnetico e gravitazionale (figura 14).

Un'operazione di uscita dall'orbita (*deorbiting*) all'apogio dell'ultima farà collassare Juno contro Giove

per evitare che la sonda possa colpire e danneggiare le lune galileiane (*planetary protection*) [Bolton, 2017].

Figura 15:
Traiettoria di Juno
sul piano
equatoriale dal 28
aprile 2018 al 30
luglio 2020.

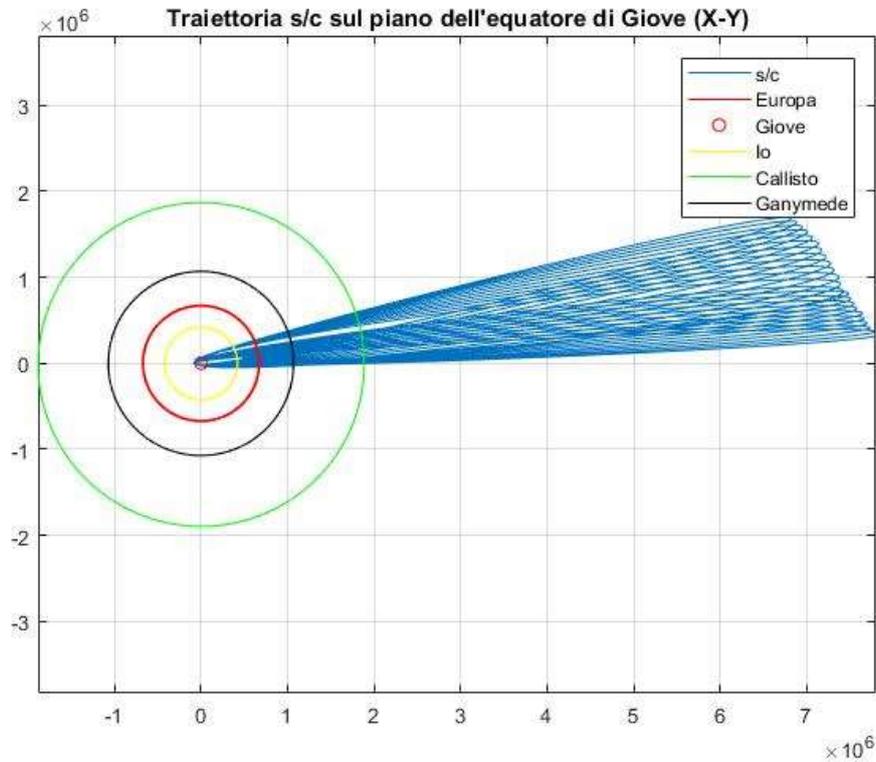
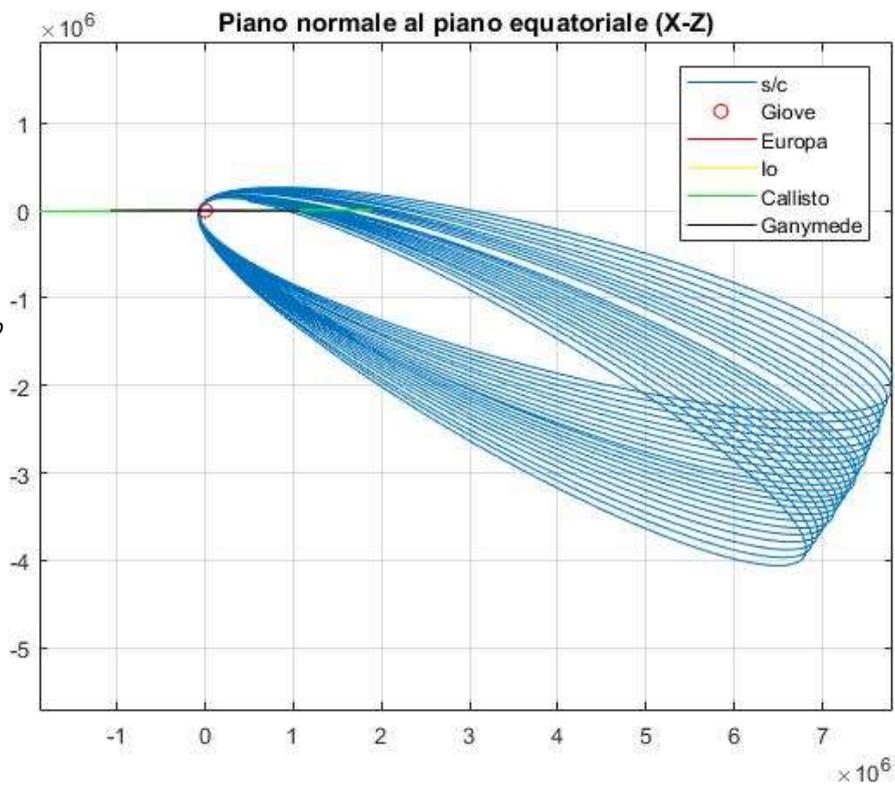


Figura 16:
Traiettoria di Juno
normale al piano
equatoriale dal 28
aprile 2018 al 30
luglio 2020. Al
procedere della
missione l'apogiovio
si abbassa.



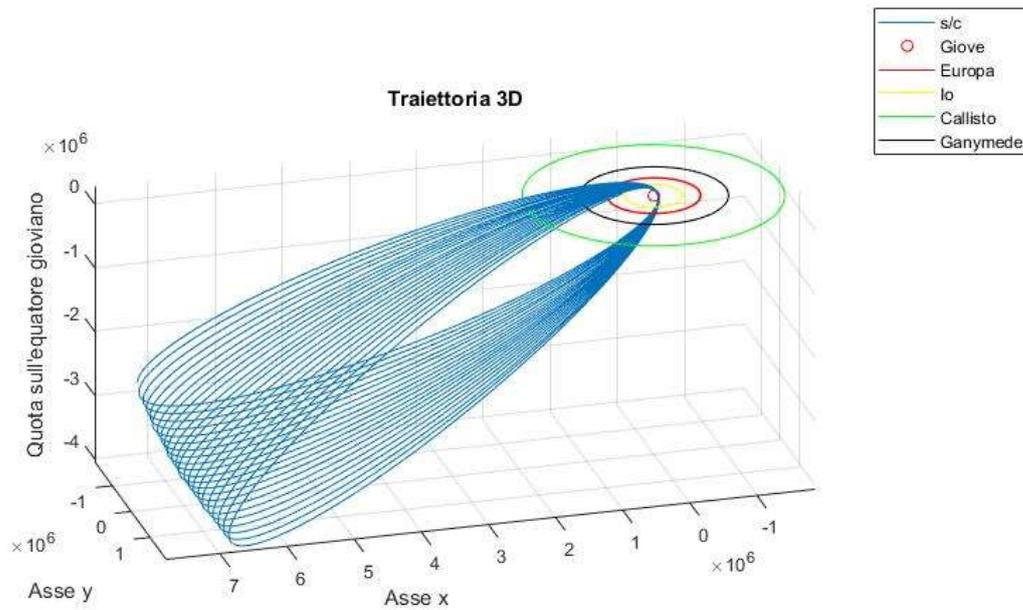


Figura 17: Traiettoria tridimensionale di Juno dal 28 aprile 2018 al 30 luglio 2020.

Per quanto la science phase di Juno cominci nel 5 luglio 2016 i kernels disponibili per lo studio della missione partono dal 29 aprile 2018, dunque la prima orbita rappresentata è la tredicesima, e da essa si arriva alla fine della missione.

4.2 Opportunità di occultazione

La geometria molto ampia e polare delle orbite di Juno semplifica e regolarizza molto l'occorrenza di occultazioni, che si presentano in modo del tutto simile in ognuna delle orbite studiate. Il perigio è intero al polo di Io, la sua latitudine varia da 3 gradi durante la prima orbita a quasi 31 durante l'ultima, e si trova a 4300 chilometri sopra le più alte nubi dell'atmosfera gioviana; per questa ragione è al perigio, o comunque nel suo intorno, e solo in questa fase di ogni orbita, che la frequenza di trasmissione subisce uno sfasamento.

Considerando la data di stesura dell'elaborato, e la sua finalità predittiva, si è deciso di valutare le opportunità di occultazione della science phase di Juno a partire dalla orbita 22, ovvero quella il cui perigio ha avuto luogo il 12 settembre 2019 alle 03:40 (TAB.2). I kernels utilizzati per lo studio della missione sono i seguenti:

- *jup310.bsp* per il sistema gioviano;
- *de438s.bsp* per le effemeridi del sistema solare;
- *pck00010.tpc* per i reference frames, con l'aggiunta di un kernel a parte per il JUPITER_CENTRIFUGAL;
- *naif0012.tls* per il riferimento temporale;
- *juno_spk_ref_180429_210731_180509.bsp* per la sonda Juno (Spice_ID = -61).

Eseguendo i due script descritti in precedenza è interessante vedere il profilo del totale contenuto elettronico in tutta la finestra temporale compresa tra 1° settembre 2019 alle ore 00:00 e il 31 luglio 2021 (figura 18). Ogni volta che dal valore zero si stacca un picco, lì vi è un'occultazione; osservando

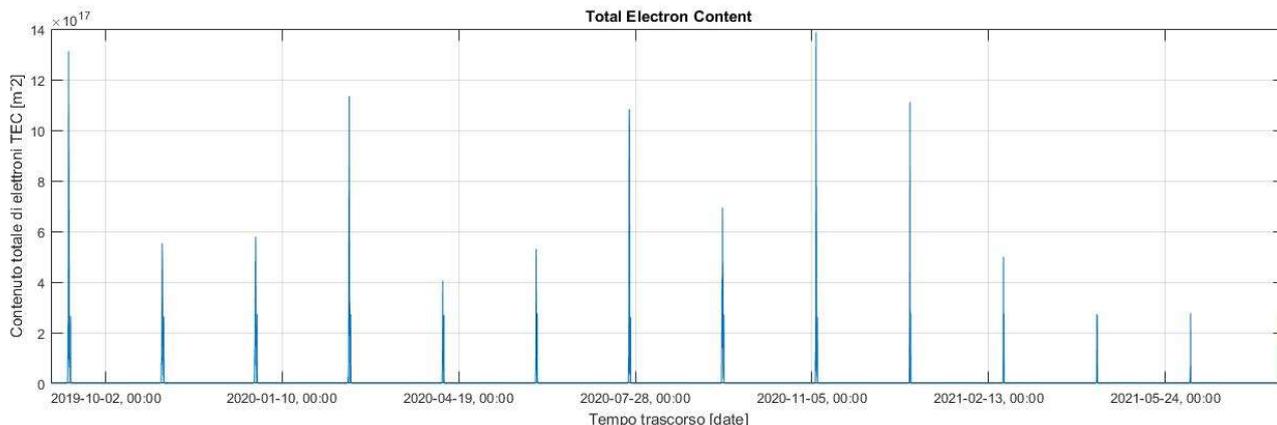


Figura 18: Contenuto totale di elettroni dal 1° settembre 2019 al 31 luglio 2021 relativo alla missione Juno.

il grafico si possono contare 14 momenti di occultazione, uno per ogni orbita dalla 22 alla 35. La risoluzione temporale non è ancora sufficientemente alta per distinguere cosa accada in ogni picco, ma si può notare la regolarità del fenomeno: i valori non nulli di totale contenuto elettronico sono raccolti in zone equidistanti a prova del fatto che le occultazioni non solo si verificano in un solo momento per orbita, ma anche più o meno nello stesso punto di ognuna di esse. Il path delay ha un

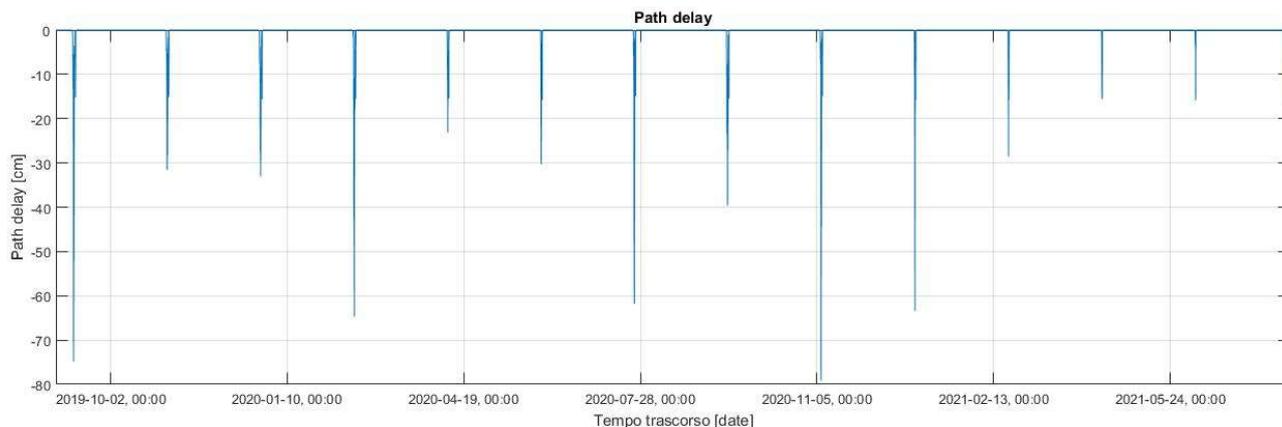
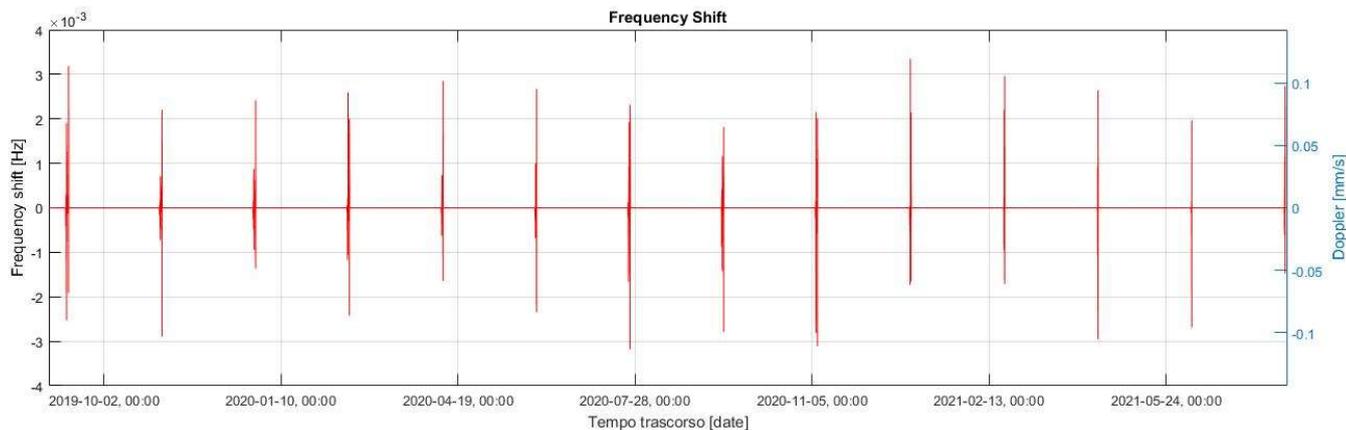


Figura 19: Path delay tra 1° settembre 2019 e 31 luglio 2021 relativo alla missione Juno.

Figura 20: Frequency shift tra 1° settembre 2019 e 31 luglio 2021 relativo alla missione Juno.



andamento del tutto analogo a meno del segno, sarà non nullo nelle stesse zone in cui non è nulla la TEC (figura 19), e lo stesso vale per il frequency shift (figura 20).

Alla luce della regolarità del fenomeno non si riporteranno all'interno dell'elaborato i profili notevoli relativi ad ogni perigiovio, ma lo studio di uno preso come modello è importante per verificare cosa realmente accada al frequency shift, al totale contenuto elettronico e al path delay durante la fase di occultazione. Dati quantitativi relativi ad ogni orbita sono raccolti nella tabella **TAB.2** riportata a fine sezione.

Perigiovio 31 Il perigiovio 31 occorre il 30 dicembre 2020 alle 21:44, e per quanto l'orbita sia di 53 giorni, la zona di occultazione è molto più breve. Eseguendo gli script come ci si aspettava il grappolo di occultazioni relative all'orbita 31 si raccoglie intorno al perigiovio, in un intervallo di tempo di circa una giornata e con un picco di frequency shift di 0.0034 Hz (figure 21-22).

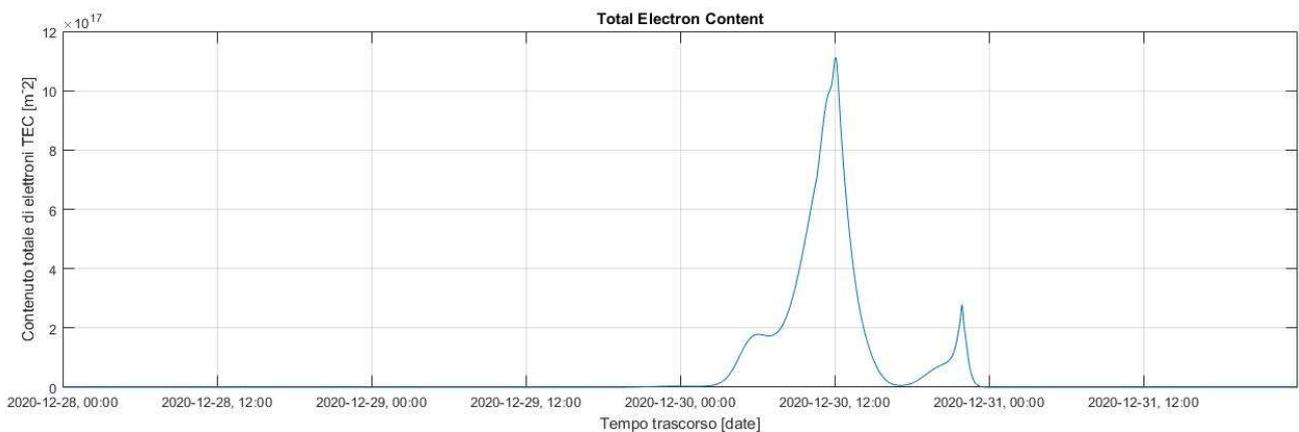


Figura 21: TEC tra il 28/12/2020, 00:00 e 01/01/2021, 00:00.

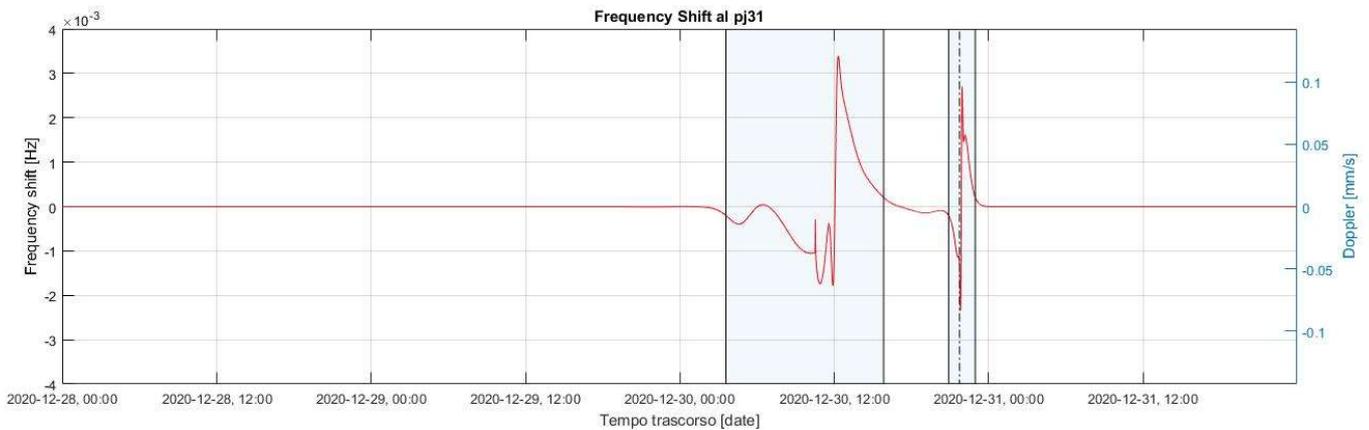
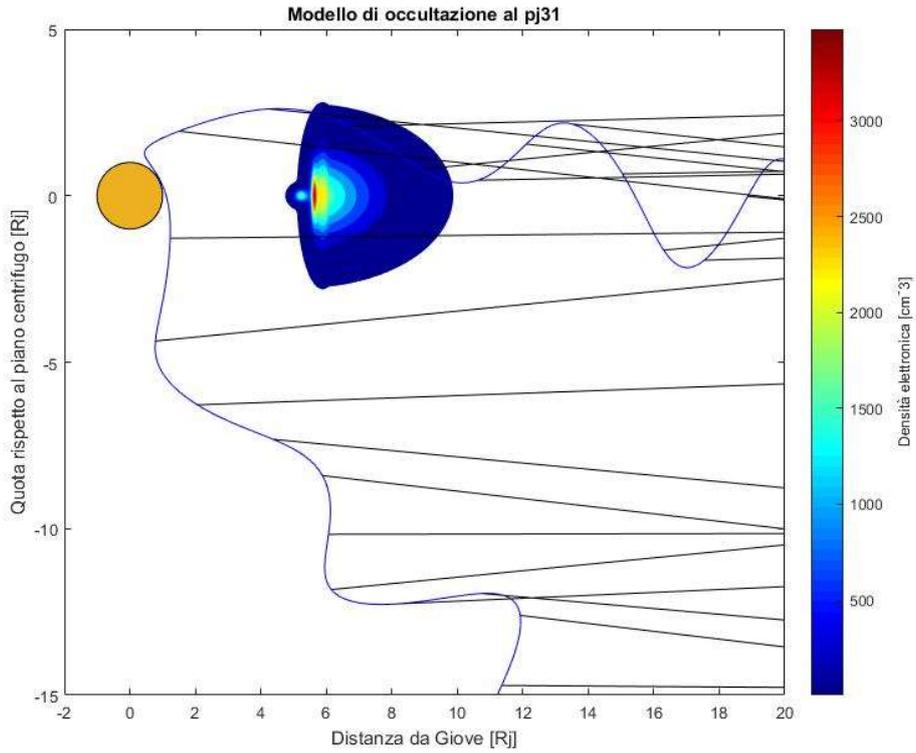


Figura 22: Frequency shift tra 28/12/2020, 00:00 e 01/01/2021, 00:00.

La linea tratteggiata in verticale in figura 22 rappresenta il momento esatto di attraversamento del perigio da parte della sonda Juno, e corrisponde al centro di un'occultazione; qualche ora prima però risulta esserci stata un'altra fase di occultazione addirittura più lunga ed intensa rispetto alla successiva. Questo attesta come nell'intorno di ogni perigio non vi sia una singola occultazione, ma ve ne sia un gruppo, tuttavia una cosa simile è geometricamente di difficile giustificazione.

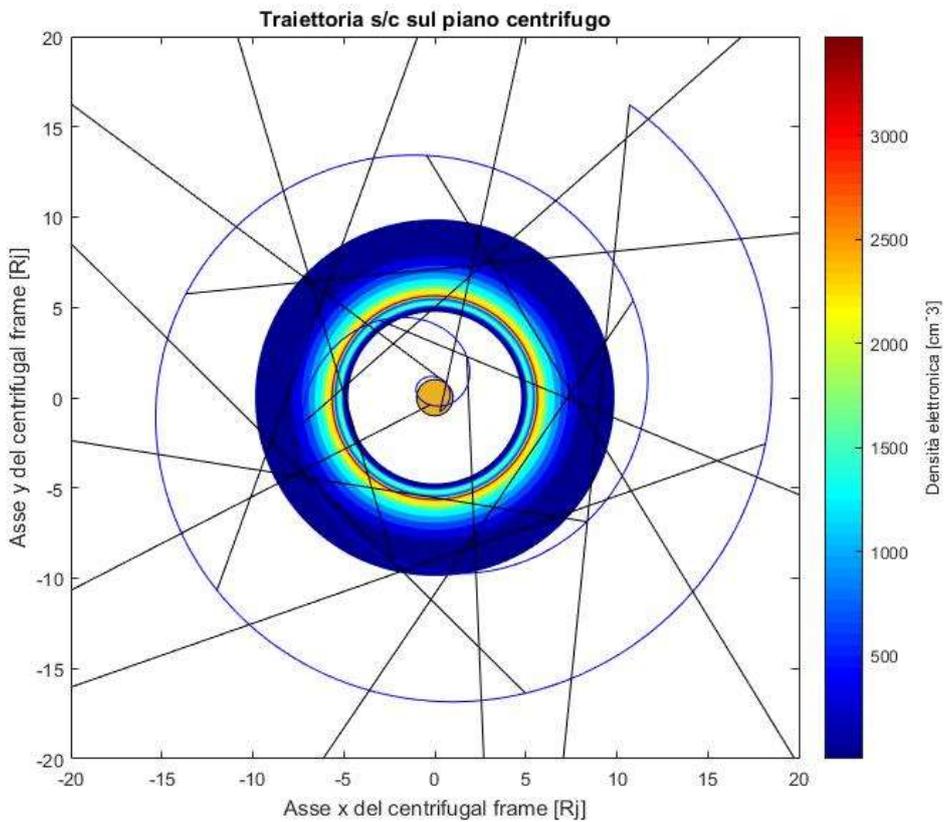
Con l'ausilio di due grafici che riportino la traiettoria della sonda tra il 30/12/2020, 00:00, e il 31/12/2020, 01:00, la traccia delle congiungenti tra sonda e Terra, e il toro di Io sui piani xy e xz del riferimento centrifugo, si può vedere come la congiungente continui effettivamente per 25 ore ad attraversare il toro in qualche punto (figure 23-24). Il grafico relativo al piano centrifugo (xy) è il

Figura 23:
Traiettoria di
Juno (blu),
Giove
(arancione),
congiungenti
Terra-sonda
(nero) e IPT.



più eloquente, e mostra anche come prima del perigio le congiungenti non attraversino una, ma in certi casi due volte il plasma; per questo il picco di frequency shift nell'intorno del perigio 31 lo si ha quasi 12 ore prima di questo, e non in sua corrispondenza.

Figura 24:
Traiettoria di
Juno (blu),
Giove
(arancione),
congiungenti
Terra-sonda
(nero) e IPT.



Altri perigiovi notevoli Si riportano qui di seguito alcuni grafici dell'andamento di TEC e frequency shift relativi a perigiovi che si distinguono in modo particolare. Il pj27 (figura 25) e il pj33 (figura 26) ad esempio contengono i più alti picchi di frequency shift di tutta la missione.

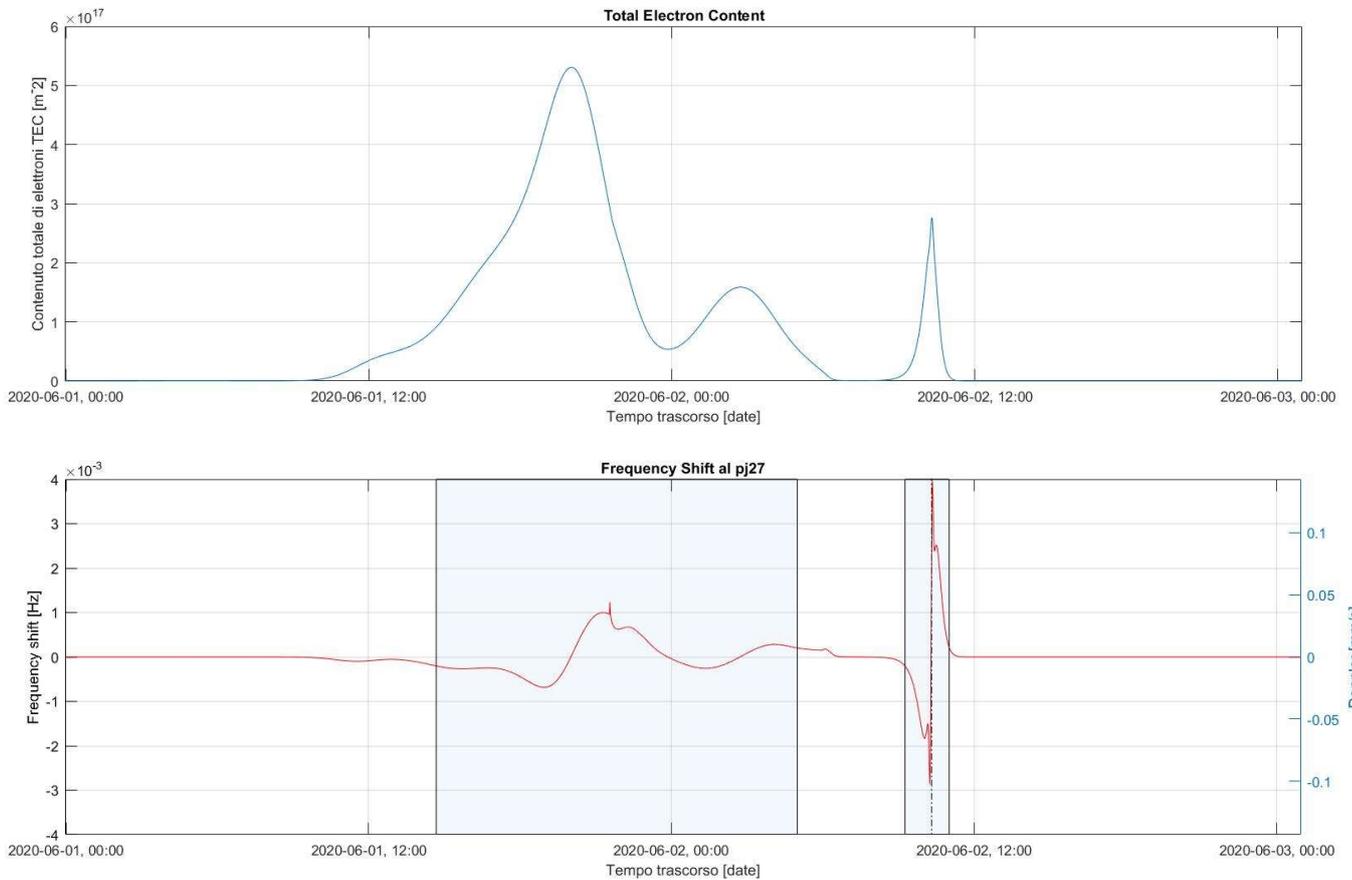


Figura 25: Fase di occultazione al perigio 27 (2 giugno 2020, 10:19), profilo di TEC (IN ALTO) e di frequency shift (IN BASSO).

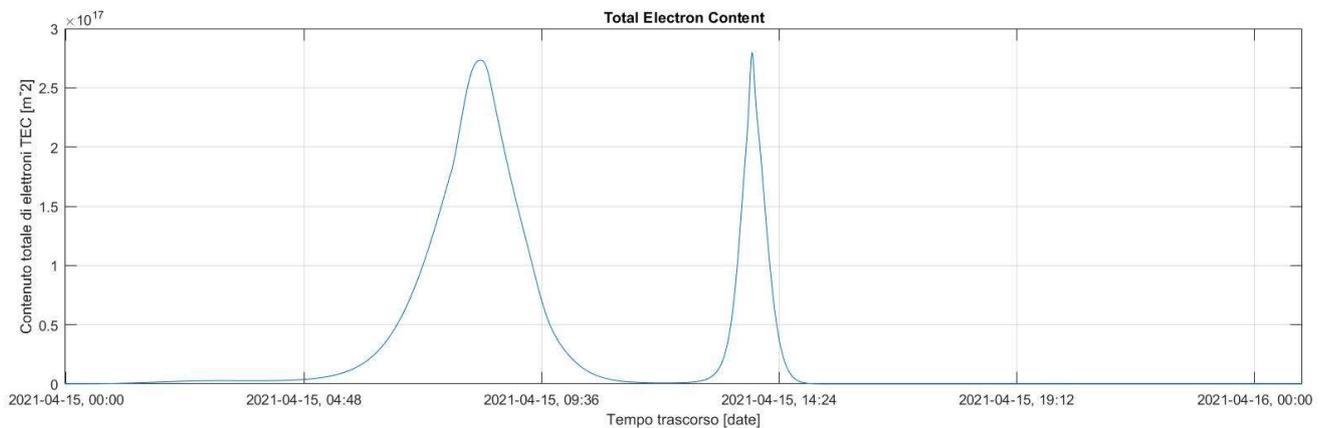


Figura 26: Fase di occultazione al perigio 33 (15 marzo 2021, 13:36), profilo di TEC (IN ALTO) e di frequency shift (IN BASSO).

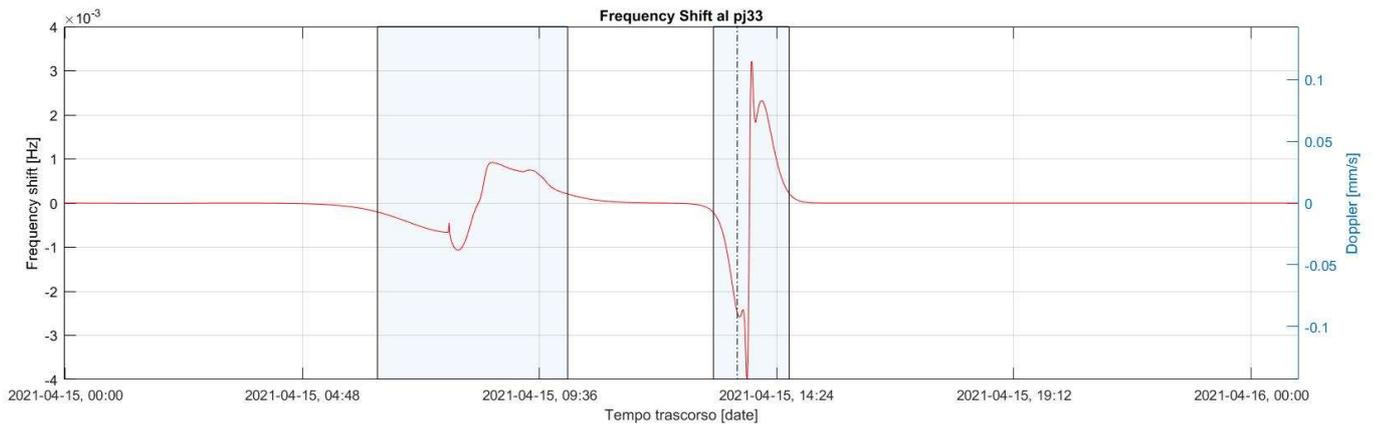


Tabella con dati quantitativi circa le occultazioni Questa tabella (TAB.2) contiene informazioni su tutte le occultazioni della missione Juno dall'orbita 22 all'orbita 35 (dal perigio 22 al perigio 35); date di inizio e fine occultazione, picchi positivi e negativi di frequency shift, valori massimi di path delay e durata in secondi. In blu sono state evidenziate le occultazioni citate in precedenza, mentre in grigio chiaro quelle più intense per ogni orbita.

TAB.2					
Inizio Occultazione	Fine occultazione	Massimo frequency shift positivo [Hz]	Massimo frequency shift negativo [Hz]	Massimo path delay [cm]	Durata [s]
Orbita 22 => pj22=12/09/2019, 03:40					
10/09/2019 13:22	11/09/2019 11:28	0.0019	-0.0026	-74.9242	79600
12/09/2019 02:23	12/09/2019 04:18	0.0039	-0.0024	-15.6825	6900
Orbita 23 => pj23=03/11/2019, 22:17					
02/11/2019 18:47	03/11/2019 10:20	$7.3496 * 10^{-4}$	$-7.3527 * 10^{-4}$	-31.5699	55980
03/11/2019 21:47	03/11/2019 23:33	0.0027	-0.0035	-15.7893	6360
Orbita 24 => pj24=26/12/2019, 17:35					
25/12/2019 08:08	25/12/2019 09:20	/	$-2.5695 * 10^{-4}$	-7.4366	4320
25/12/2019 13:26	26/12/2019 03:22	$8.9991 * 10^{-4}$	$-98660 * 10^{-4}$	-33.0503	50160
26/12/2019 07:07	26/12/2019 08:51	$3.3092 * 10^{-4}$	/	-10.4985	6240
26/12/2019 15:38	26/12/2019 18:32	0.0029	-0.0018	-15.7236	10440
Orbita 25 => pj25=17/02/2020, 17:51					
16/02/2020 12:51	17/02/2020 10:14	0.0026	-0.0012	-64.7582	76980
17/02/2020 17:10	17/02/2020 19:13	0.0025	-0.0027	-15.8674	7380
Orbita 26 => pj26=10/04/2020, 13:46					

09/04/2020 19:24	10/04/2020 07:46	$7.3427 * 10^{-4}$	$-6.2804 * 10^{-4}$	-23.1554	44520
10/04/2020 12:01	10/04/2020 14:31	0.0033	-0.0018	-15.6202	9000
Orbita 27 => pj27=02/06/2020, 10:19					
01/06/2020 14:43	02/06/2020 05:02	0.0012	$-6.8390 * 10^{-4}$	-30.2857	51540
02/06/2020 09:18	02/06/2020 11:03	0.0040	-0.0029	-15.7619	6300
Orbita 28 => pj28=25/07/2020, 06:14					
24/07/2020 01:14	24/07/2020 01:26	/	$-2.0123 * 10^{-4}$	-4.7704	720
24/07/2020 07:02	24/07/2020 21:01	0.0019	-0.0017	-61.8247	50340
25/07/2020 01:37	25/07/2020 02:15	$2.2404 * 10^{-4}$	/	-5.1194	2280
25/07/2020 05:46	25/07/2020 07:21	0.0031	-0.0038	-15.8576	5700
Orbita 29 => pj29=16/09/2020, 02:10					
14/09/2020 21:29	15/09/2020 10:54	0.0012	-0.0015	-39.6591	48300
15/09/2020 13:27	15/09/2020 18:59	$6.1312 * 10^{-4}$	$-2.0091 * 10^{-4}$	-27.2197	19920
16/09/2020 01:39	16/09/2020 03:36	0.0024	-0.0031	-15.8163	7020
Orbita 30 => pj30=08/11/2020, 01:49					
06/11/2020 21:37	06/11/2020 22:48	/	$-2.4467 * 10^{-4}$	-5.9680	4260
07/11/2020 03:40	07/11/2020 17:50	0.0022	-0.0029	-79.1626	51000
08/11/2020 01:24	08/11/2020 03:09	0.0026	-0.0036	-15.7759	6300
Orbita 31 => pj31=30/12/2020, 21:44					
30/12/2020 03:36	30/12/2020 15:52	0.0034	-0.0018	-63.4308	44160
30/12/2020 20:55	30/12/2020 22:59	0.0027	-0.0023	-15.8694	7440
Orbita 32 => pj32=21/02/2021, 17:40					
21/02/2021 07:30	21/02/2021 13:34	0.0022	$-9.5885 * 10^{-4}$	-28.5809	21840
21/02/2021 16:27	21/02/2021 18:25	0.0037	-0.0025	-15.7460	7080
Orbita 33 => pj33=15/04/2021, 13:36					
15/04/2021 06:21	15/04/2021 10:12	$9.2634 * 10^{-4}$	-0.0011	-15.5968	13860
15/04/2021 13:09	15/04/2021 14:41	0.0032	-0.0041	-15.9717	5520
Orbita 34 => pj34=07/06/2021, 09:31					
07/06/2021 09:10	07/06/2021 11:04	0.0023	-0.0034	-15.9466	6840
Orbita 35 => pj35=30/07/2021, 04:32					
29/07/2021 19:32	30/07/2021 00:23	0.0012	$-6.1545 * 10^{-4}$	-15.7526	17460
30/07/2021 02:55	30/07/2021 05:27	0.0033	-0.0022	-15.8211	9120

5. Missione Europa Clipper

La missione Europa Clipper (precedentemente chiamata *Europa Multiple flyby Mission*) è una missione interplanetaria ancora in programmazione da parte della Nasa, con data di lancio prevista nel giugno 2025. Si inserisce tra le *Large Strategic Planet Missions*, nella *Planetary Science Division*, missioni di classe A, ad alta priorità e basso rischio, con costi importanti e obiettivi ambiziosi. Le missioni *Voyager*, *Galileo* e *Cassini* rientrano in questo gruppo.

Dal 2017 Europa Clipper è stata in una fase di design preliminare (fase B), seguita nell'agosto 2019 dall'ingresso in una fase di design finale e fabbricazione (fase C). Trattandosi di un progetto che impiegherà ancora almeno tre anni ad essere avviato non ci si aspetti di disporre della stessa quantità di dati diffusi sulla missione Juno. La struttura della traiettoria segue alcune strategie che probabilmente non verranno modificate nel tempo, ma nessuno può garantire che tutto rimanga perfettamente inalterato fino al lancio. In questo elaborato si fa riferimento alla traiettoria di missione "17F12v2", per ora giudicata coerente con i tipi di rilevazione che Europa Clipper si propone di effettuare [Verma, 2018].

Il motivo di una missione di ricognizione della luna galieliana Europa è quello di approfondire le indagini su alcune delle scoperte della sonda *Galileo* durante la sua permanenza intorno a Giove, in particolare l'esistenza di un oceano al di sotto della superficie del satellite naturale, completamente coperto da una spessa crosta di ghiaccio.

Obiettivi Come prima rappresentante dell'iniziativa OWE¹⁴ i principali obiettivi di Europa Clipper ruotano tutti intorno alla ricerca di un oceano "sommerso" dai ghiacci superficiali di Europa. La missione si definisce "di ricognizione" poiché non sarà equipaggiata con un lander, ma dovrà esplorare il satellite sfruttando i perigiovi della science phase, investigando sull'abitabilità della luna [Senske, 2013], e raccogliendo i dati necessari per scegliere un sito di atterraggio per il futuro *Europa Lander*¹⁵. L'esplorazione si concentra sull'indagare tre aspetti del satellite gioviano:

- Confermare l'esistenza di un oceano sotto la crosta ghiacciata del corpo celeste, studiarne l'acqua sia allo stato liquido che allo stato solido, e valutare i processi osmotici tra superficie ghiacciata e acqua liquida;
- Analizzare la distribuzione di composti chimici notevoli, e loro presenza/ruolo nella composizione/formazione dell'oceano;
- Studiare la geologia del satellite, le caratteristiche della superficie e del fondale oceanico [Senske, 2013].

Orbiter e payload La sonda Europa Clipper utilizzerà pannelli solari come fonte di energia, più pesanti ma economici del generatore termoelettrico a plutonio-238 proposto come alternativa. L'ambiente fortemente ionizzato in cui la missione avrà luogo richiede si preveda che la magnetosfera

¹⁴ *Ocean Worlds Exploration Program*: Programma di missioni lanciato dalla Nasa con l'obiettivo di esplorare il sistema solare esterno alla ricerca di oceani nascosti al di sotto della superficie di alcuni corpi celesti, valutarne l'abitabilità e cercare semplici forme di vita extraterrestre. Targets principali sono attualmente Europa, Titano ed Encelado.

¹⁵ Missione di matrice astrobiologica ancora solamente proposta e pensata per essere complementare alla missione di ricognizione Europa Clipper.

di Giove degraderà i pannelli nel tempo, per il resto della sonda si riproporranno le tecnologie protettive al titanio già utilizzate per Galileo e Juno.

La missione sarà equipaggiata con nove strumenti adibiti a scopi diversi (figura 27): tecnologia per mappare a lunghezze d'onda diverse la superficie di Europa (E-THEMIS, MISE, EIS ed Europa - UVS), un radar a doppia frequenza che possa penetrare i ghiacci del satellite (REASON),

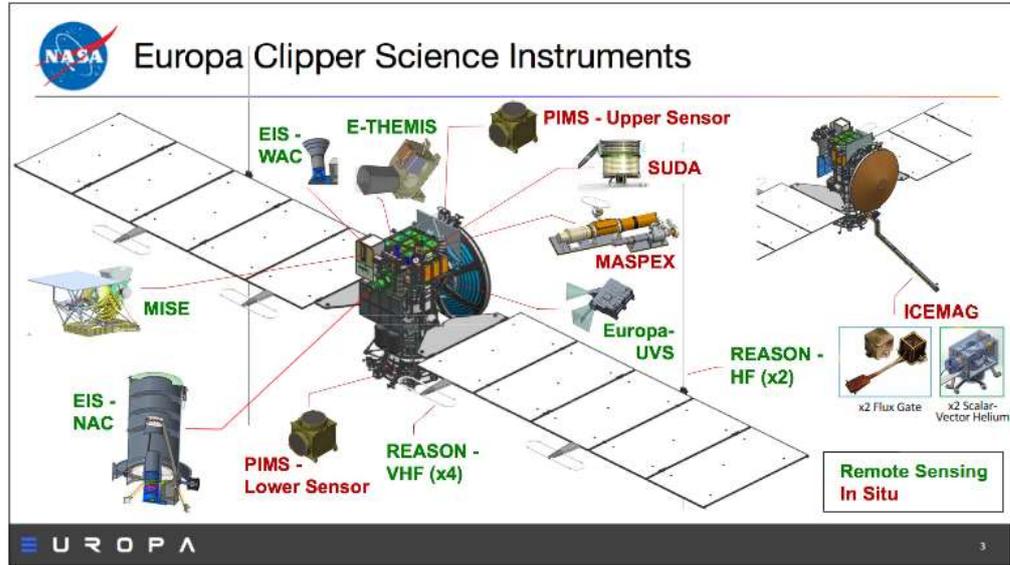


Figura 27: Payload della missione Europa Clipper con schizzo dell'orbiter.

un magnetometro (ICEMAG), un misuratore di plasma (PIMS), e strumenti per analizzare materiale emesso dalla superficie della luna gioviana (MASPEX, SUDA) [JPL, 2019].

Comunicazione con la Terra Come per Juno anche qui è importante specificare come la sonda comunicherà con la Terra, poiché la frequenza di trasmissione del segnale di downlink gioca un ruolo importante negli algoritmi utilizzati per valutare le opportunità di occultazione. Senza approfondire quali e quante antenne verranno montate sulla sonda, i segnali in uplink saranno segnali in banda X con una portante a frequenza 7.2 GHz, mentre quelli in donwlink avranno coerentemente una frequenza portante di 8.4 GHz, esattamente come nel caso della sonda Juno [Verma, 2013]. Questa linea di comunicazione viene sfruttata per effettuare misurazioni sulla gravità di Europa: la gravità del pianeta è direttamente responsabile di velocità e traiettoria assunta dalla sonda, e alla sua velocità è possibile risalire valutando il frequency shift dovuto all'effetto Doppler [Verma, 2013]. Il frequency shift è tuttavia affetto da un'incertezza che in parte è legata proprio all'alterazione di frequenza del segnale generata dal plasma della magnetosfera gioviana.

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_{IPT}^2 + \sigma_{altro}^2} + 0.01mm/s$$

In questa formula [Verma, 2013] si rappresenta in modo semplificato il problema del toro di Io, e come nella prospettiva di effettuare indagini sul campo gravitazionale del satellite il frequency shift (in questo caso il Doppler shift) "sporchi" le misurazioni introducendo un'incertezza.

Juno, diversamente da Europa Clipper, dispone di due bande di trasmissione, ed è per questo in grado di isolare il frequency shift dovuto al toro di Io, capovolgere il problema e fornire informazioni utili per perfezionare il modello di toro attualmente utilizzato. Europa Clipper non può fornire questi dati; prevenire le opportunità di occultazione ha il solo scopo di sapere quando il Doppler shift delle rilevazioni effettuate sia modificato da un σ_D non nullo.

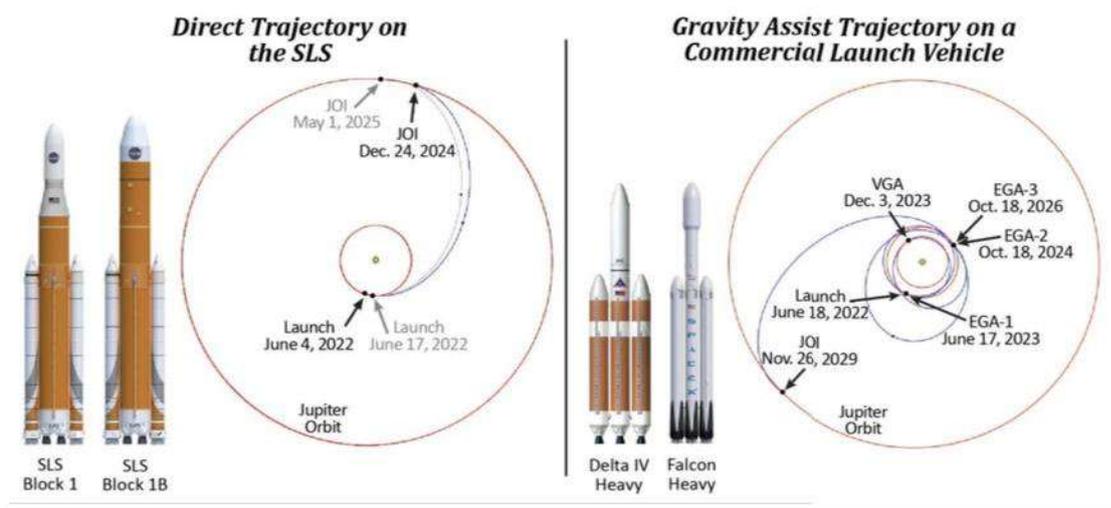
Esperimenti di gravity science Le rilevazioni sul campo gravitazionale di Europa, per quanto apparentemente non correlate con gli scopi principali della missione, sono in realtà fondamentali; esperimenti di *gravity science*, specialmente relativi agli sforzi mareali agenti sul satellite gioviano, sono stati designati come strumento principale di misurazione della missione [Verma, 2013]. Un

GSWG¹⁶ è stato incaricato dalla Nasa di valutare le investigazioni più opportune perché Europa Clipper possa raggiungere gli obiettivi prefissati: misurando i cosiddetti *tidal Love numbers* k_2 e h_2 sarà possibile confermare la presenza di oceani sotto la crosta di Europa, o ancora valutare lo spessore dei ghiacci sulla superficie della luna galileiana [Verma, 2013]].

5.1 Traiettoria di Europa Clipper

Nel profilo corrente della missione il lancio si colloca in una finestra temporale di quattro anni, dal 2022 al 2025, in base al vettore che si sceglierà di utilizzare. L'alternativa più quotata è il SLS¹⁷ per portare la sonda attraverso una traiettoria diretta dalla Terra a Giove in meno di tre anni, senza ricorrere a DSMs. Se il lanciatore non dovesse essere pronto entro i tempi di lancio previsti un alternativo profilo di traiettoria prevedrebbe di utilizzare un razzo commerciale come il Delta IV Heavy o il Falcon Heavy. Dopo il lancio la sonda raggiungerebbe Giove con una cruise phase di circa sei anni, composta da una manovra di gravity assist su Venere, e due sulla Terra (figura 28) [Martin, 2019].

Figure 1: Europa Flight Trajectory Options



Source: NASA OIG presentation of Agency information.

Note: Jupiter Orbit Insertion (JOI), Venus Gravity Assist (VGA), first Earth Gravity Assist (EGA-1), second Earth Gravity Assist (EGA-2), and third Earth Gravity Assist (EGA-3).

Figura 28: Alternative cruise phases per missioni interplanetarie verso Europa con supposto lancio nel 2022. SINISTRA - Lanciatore SLS, traiettoria diretta dalla Terra a Giove in meno di tre anni. DESTRA - Esempio di combinazione di gravity assist con Terra e Venere per il raggiungimento di Giove.

La sonda, invece che raggiungere direttamente Europa, si inserirà nell'orbita di Giove, e comincerà ad effettuare una serie di ellissi di assestamento mirate ad avvicinare il perigio ad Europa. Quelle a cui punta Europa Clipper sono osservazioni ravvicinate del satellite gioviano dai pericentri di orbite intorno al gigante gassoso. Il motivo di questa scelta è da cercare nel fallimento dei precedenti progetti di *Europa Orbiter* e *JIMO*, progetti troppo costosi perché pensati con lo stesso scopo di Europa Clipper, ma naufragati a causa dell'idea di mettere una sonda in orbita intorno ad Europa. L'ambiente nell'intorno della luna galileiana, a circa nove raggi gioviani dal centro di Giove, è infatti sottoposto

¹⁶ Gravity Science Working Group.

¹⁷ Space Launch System: lanciatore super heavy-lift ancora in fase di sviluppo, ma programmato per essere il vettore, tra le altre, delle future missioni Artemis.

all'effetto delle radiazioni della magnetosfera, e richiede una particolare attenzione alle strutture protettive da installare sulla sonda; si è dunque giudicato più sicuro utilizzare delle orbite intorno a Giove, che permettano alla sonda di spendere più tempo in zone con meno plasma [Pappalardo,2013].

Un altro aspetto vantaggioso di questa idea è legato alle tempistiche di trasmissione. Gli strumenti a bordo di Europa Clipper raccolgono dati molto più velocemente di quanto a Terra impieghino a riceverli, dunque lasciar passare un po' più di tempo (7-10 giorni) tra un flyby e il successivo, allargando l'orbita da un'ellisse rispetto ad Europa ad un'ellisse rispetto a Giove, non può che essere di aiuto per gestire in più tempo disponibile l'invio di informazioni a Terra.

La sonda completerà circa una settantina di orbite intorno a Giove, di cui 45 avranno dei flyby di Europa ad altitudini variabili tra i 25 e i 2700 km nell'arco di circa 3.5 rimanenti anni di missione (dopo la JOI¹⁸) [Pappalardo, 2013]. I periodi oscillano in modo irregolare prima che si effettui il primo volo ravvicinato sulla luna galileiana (25 marzo 2029, 18:14) (figura 30), dopodiché cominciano ad assestarsi tra i 12 e i 17 giorni, con una maggioranza di periodi da 14 giorni. Una caratteristica fondamentale di Europa Clipper sarà l'utilizzo di manovre di gravity assist su Europa, Ganimede e Callisto per modificare più o meno drasticamente le ellissi percorse dalla sonda, cambiando inclinazione, ascensione retta, restringendo o allargando le orbite, per modificare la posizione del perigio ad ogni flyby, ed ottenere una copertura globale della superficie di Europa.

La JOI, come si può vedere nella Tabella di fine sezione, si considera coincidere con il primo

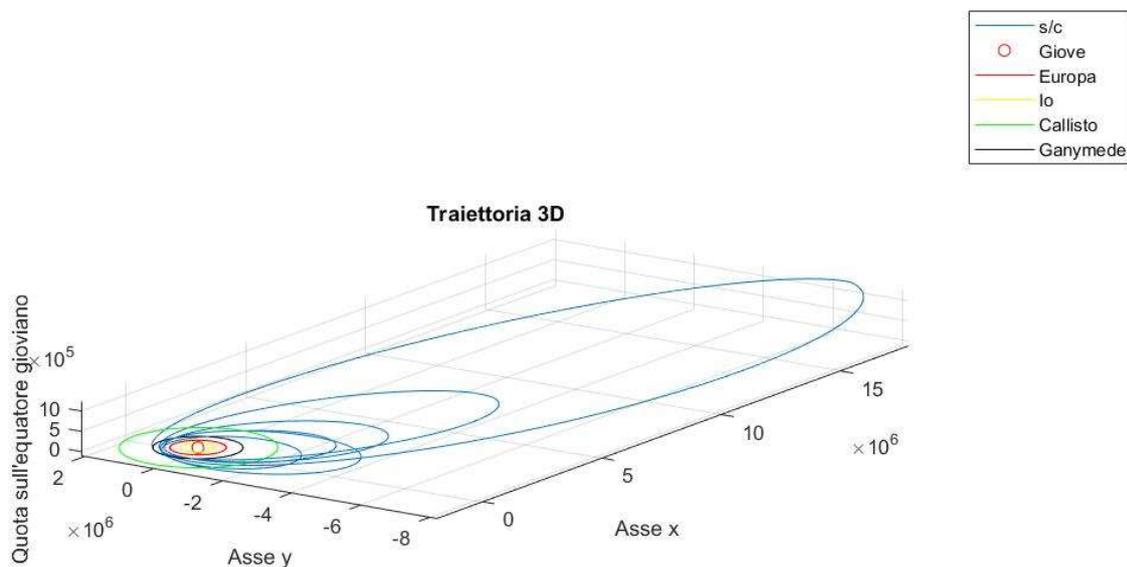


Figura 29: Fase irregolare di assestamento. Dopo la JOI il periodo delle diverse ellissi è fortemente variabile, e con esso la posizione degli apogiovi.

perigio di Europa Clipper, il 4 aprile 2028 alle 01:52, e ad essa seguono per quasi un anno una serie molto disomogenea di ellissi diverse l'una dall'altra per via di flyby di Ganimede e Callisto (figura 29). Europa è ancora lontana, ed è difficile poter già parlare di science phase. Per questo anche

¹⁸ Jupiter Orbit Insertion Inserimento in orbita gioviana.

in tabella si è parlato di una fase di riduzione del periodo (PRM), qualcosa di simile a quello che avrebbe dovuto seguire la JOI di Juno per portarne il periodo orbitale da 53 a 14 giorni. La prima ellisse ha un periodo di più di sette mesi, e da questa gli apogiovi vanno restringendosi fino al marzo 2029, mese in cui si ha il primo sorvolo ravvicinato di Europa. Il 25 marzo 2029, 18:14 si ha il primo flyby di Europa (figura 30), dove si ha una sovrapposizione delle orbite dei due corpi: comincia la science phase.

Science phase Dopo il primo perigiovio le orbite assumono una forma regolare, ellissi con periodo di circa 14 giorni quasi equatoriali; le inclinazioni sono leggermente diverse l'una dall'altra per effetto dei gravity assist effettuati su Ganimede e Callisto, ma in generale si tratta di geometrie ad inclinazione praticamente nulla. Per questa ragione i grafici sul piano equatoriale di Giove sono in realtà molto più esplicativi di quanto non fossero nel caso di Juno.

Dopo il 25 marzo 2029 la sonda continua per circa un anno a tracciare ellissi molto simili, ma la posizione del perigiovio ruota lungo la traiettoria di Europa creando la caratteristica geometria a petali tipica di tutta la science phase della missione (figura 31). Si riesce così ad ottenere una mappatura di zone sempre diverse del satellite gioviano, e non si sfrutta altro che la gravità di Ganimede e Callisto per effettuare queste modifiche ai parametri orbitali. Tutti e tre gli angoli di ascensione retta, inclinazione e argomento del pericentro cambiano, e con essi il semiasse e l'eccentricità, anche se in modo meno marcato di quanto accada agli angoli. Da una prima ellisse con linea degli apsidi praticamente parallelo all'asse y del piano equatoriale si arriva, nel maggio 2030, ad una ellisse con linea degli apsidi ruotata di più di 90 gradi rispetto alla prima.

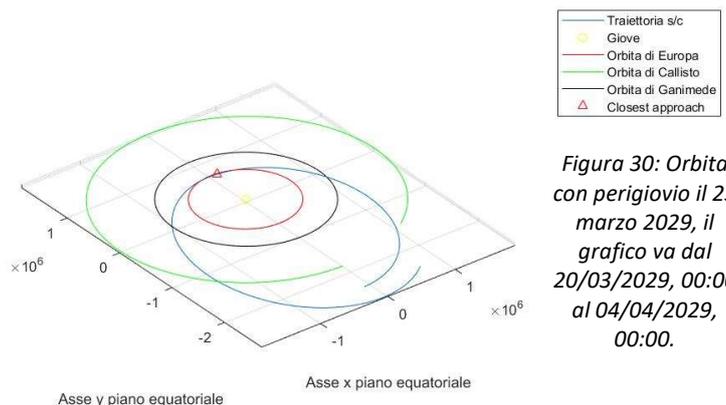


Figura 30: Orbita con perigiovio il 25 marzo 2029, il grafico va dal 20/03/2029, 00:00 al 04/04/2029, 00:00.

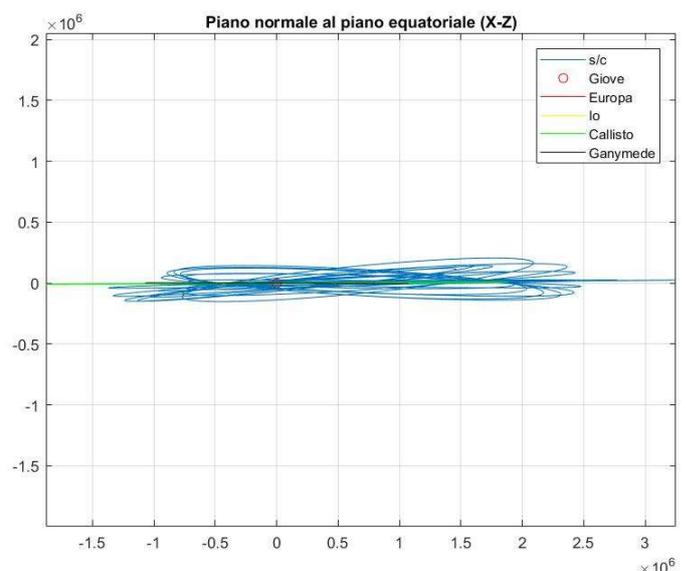
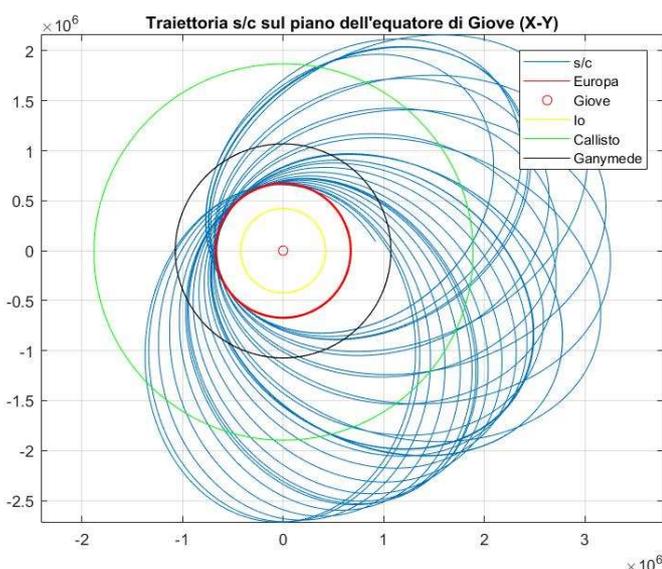


Figura 31: Traiettorie di Europa Clipper dal 25/03/2029, 00:00 al 20/05/2030, 00:00. SINISTRA – Proiezione della traiettoria sul piano equatoriale gioviano; si noti la geometria a petali. DESTRA – Proiezione normale al piano equatoriale; si noti la diversa inclinazione di ogni singola orbita

Il 27 maggio 2030 si ha un ultimo perigio sulla traiettoria di Europa (figura 32) prima di avviare una fase che durerà qualche mese e che può definirsi “di capovolgimento” (figure 33-34-35). Attraverso ripetuti gravity assist su Callisto la traiettoria della sonda viene allargata, alterata nell’inclinazione e letteralmente capovolta. Dalla stessa parte rispetto a Giove dove fino ad ora si è avuto l’apogio si verrà a trovare il perigio e viceversa.

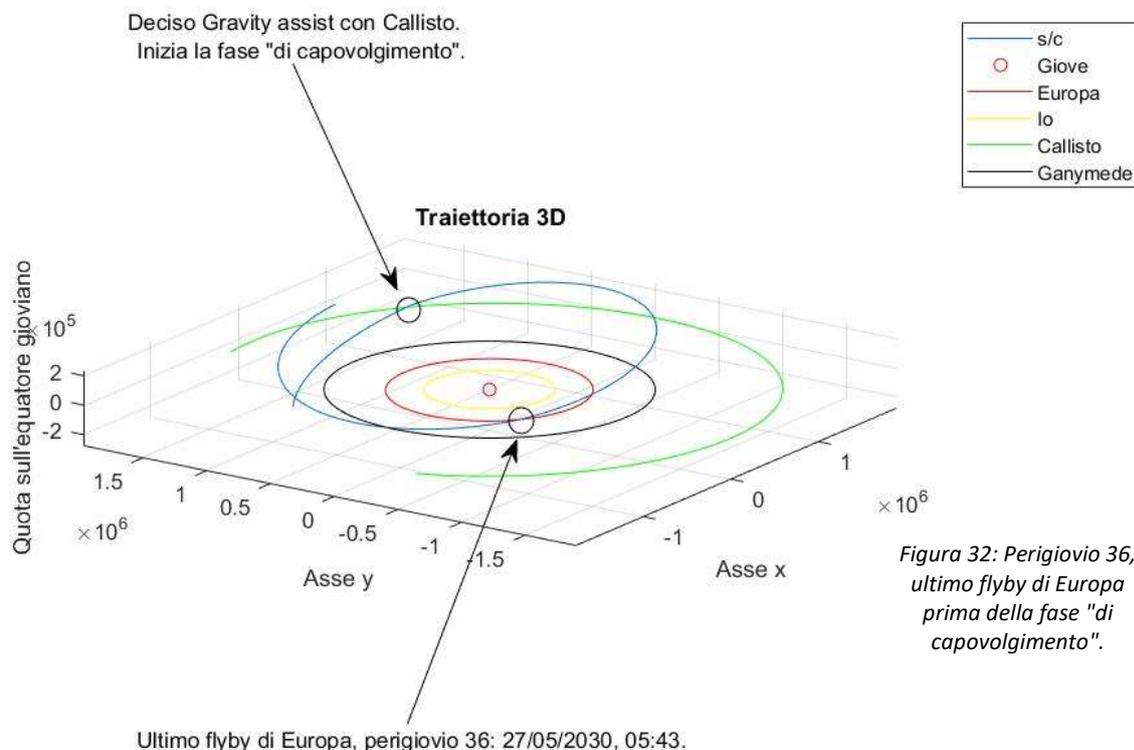


Figura 32: Perigio 36, ultimo flyby di Europa prima della fase "di capovolgimento".

Guardando il piano equatoriale è particolarmente evidente il capovolgimento effettivo del perigio con l’apogio, una transizione che viene completata al perigio 49 (10 novembre 2030, 20:37), da cui può riprendere la canonica science phase fatta di sorvoli ravvicinati di Europa. L’effetto di questa operazione dalla durata quasi 6 mesi è quello di portare il perigio a circa 180 gradi di distanza angolare dalla sua posizione all’orbita 36 senza impiegare tutto il tempo che la sonda avrebbe richiesto per arrivarvi se avesse continuato a ruotare la propria linea degli apsidi in senso antiorario come nelle precedenti orbite.

Dal perigio 49 la traiettoria di Europa Clipper riprende uno schema regolare molto simile a quanto già visto tra marzo 2029 e maggio 2030, dal novembre 2030 fino al termine della missione. Le ellissi tornano ad avere un periodo molto simile, intorno ai 14 giorni, mentre angoli e parametri geometrici cambiano leggermente di perigio in perigio per via di gravity assist con Ganimede e Callisto, in modo che i sorvoli di Europa abbiano luogo in punti sempre diversi della traiettoria. La linea degli apsidi ruota questa volta in senso orario, ancora di quasi 90 gradi (figura 36), generando un’altra serie di petali in un’altra regione dell’orbita di Europa.

Combinando le ellissi prodotte lungo tutta la missione, almeno dal primo sorvolo ravvicinato della luna galileiana (marzo 2029), si vede come i perigio, dal 8° al 75°, coprono quasi la totalità dell’orbita di Europa, garantendo la copertura globale del satellite cui si faceva riferimento sopra (figura 37) [Verna, 2013].

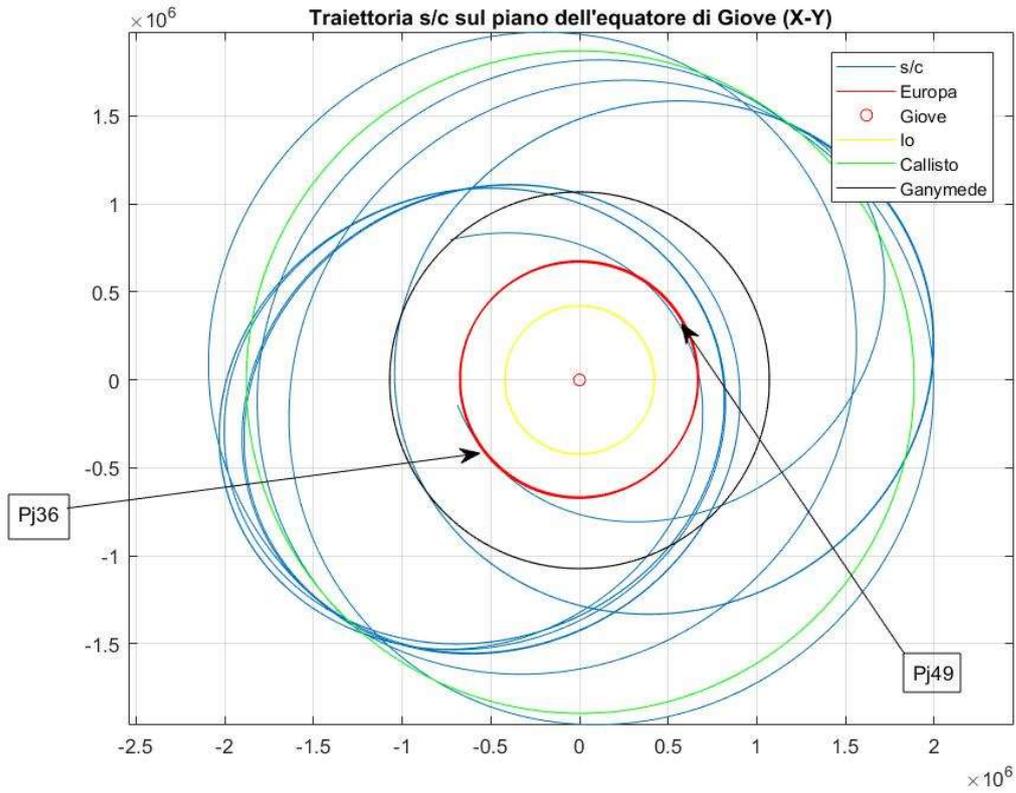


Figura 43: Proiezione sul piano equatoriale della fase "di capovolgimento".

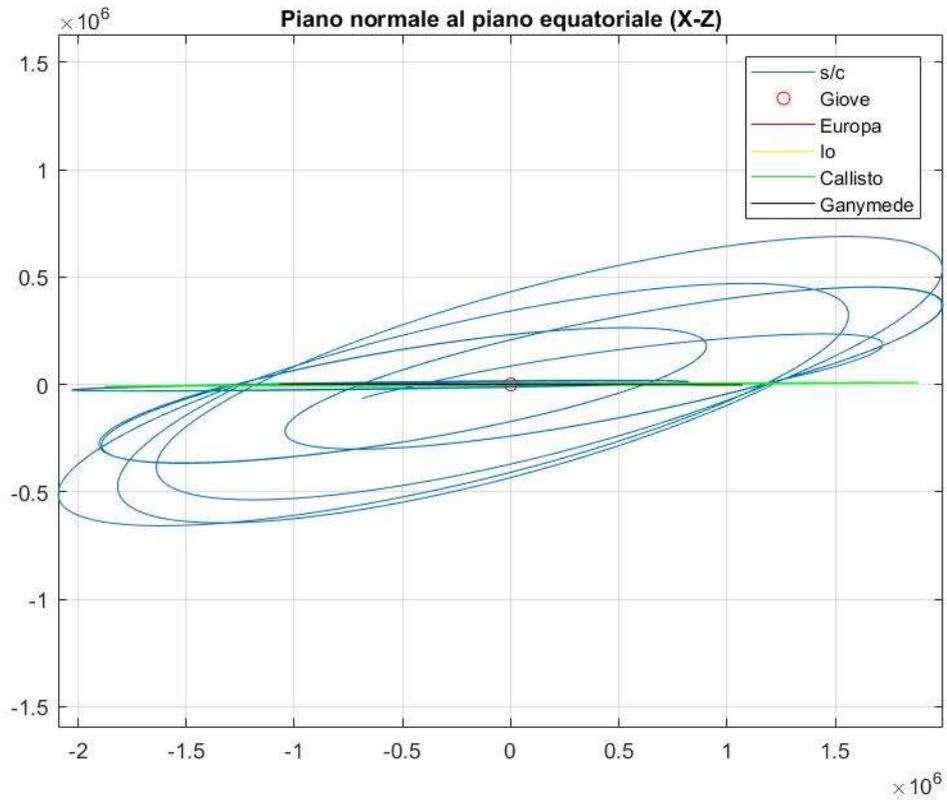


Figura 34: Proiezione normale al piano equatoriale della fase "di capovolgimento".

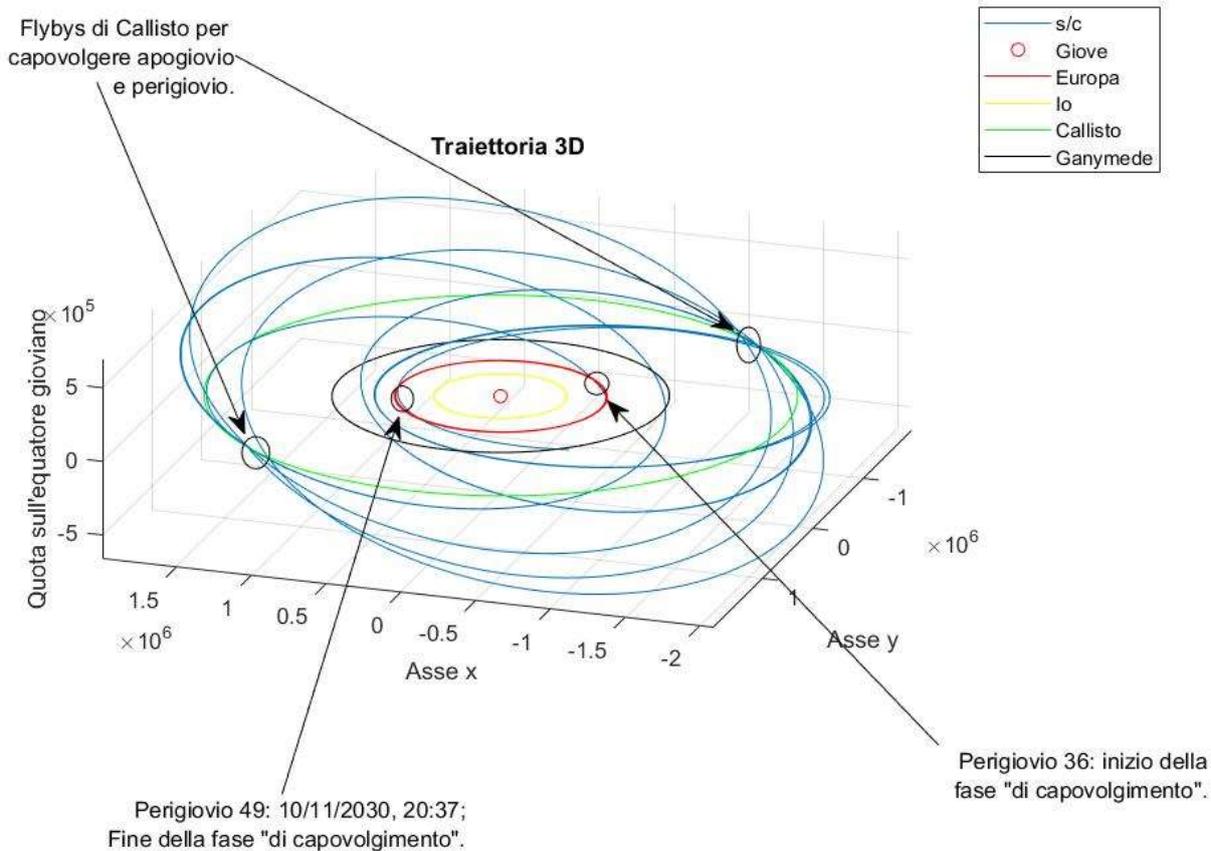


Figura 35: Fase "di capovolgimento", traiettoria tra 27/05/2030 e 10/11/2030.

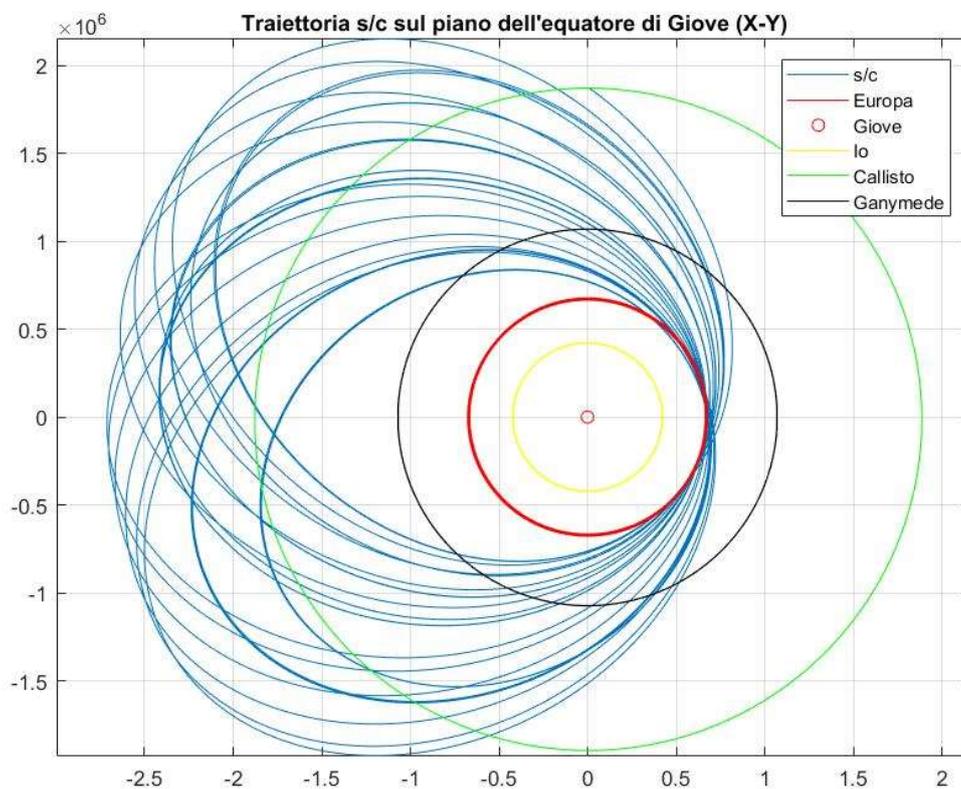


Figura 36: Traiettoria di Europa Clipper dal 10/11/2030 00:00 al 10/10/2031, 00:00.

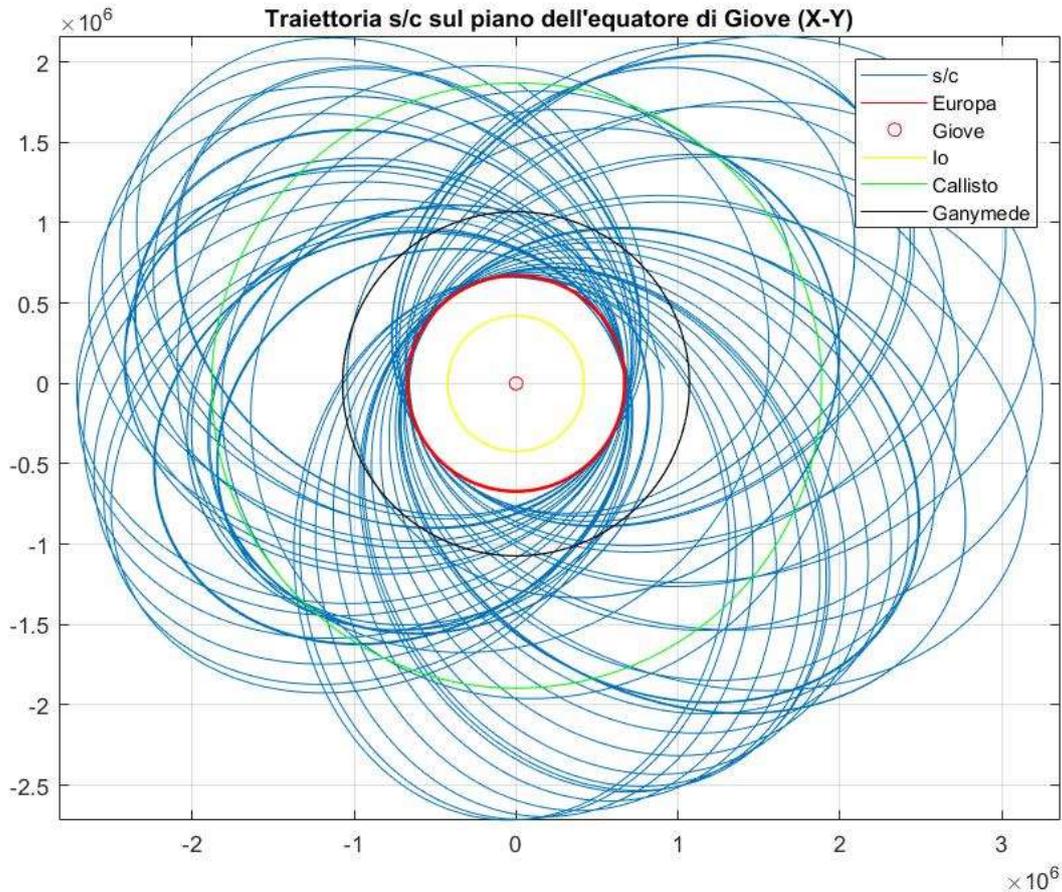


Figura 37: Proiezione sul piano equatoriale di Giove della missione Europa Clipper completa dal primo sorvolo di Europa all'esaurimento dei dati contenuti nel kernel, 10 ottobre 2031.

5.2 Opportunità di occultazione

Diversamente da Juno Europa Clipper ha orbite brevi e che variano molto nell'arco completo della missione tra rotazioni della linea degli apsidi e cambi di inclinazione. Oltre alla tabella contenente i dati quantitativi relativi a tutte le occultazioni presentatesi dal 15 marzo 2028, 13:33 al 10 ottobre 2031, 09:58 [TAB.3] e riportata a fine sezione, di seguito si cerca di commentare in modo un po' più qualitativo quanto accade in diverse fasi della traiettoria, soffermandocisi su alcune orbite modello.

Lo studio riprende la divisione della missione in quattro parti proposta in sezione 5.1; una fase di assestamento priva di sorvoli di Europa, una prima parte di science phase con orbite ellittiche simili e con linea degli apsidi rotante in senso antiorario, la fase di capovolgimento apogiovio-perigiovio e la seconda parte di science phase con linea degli apsidi rotante in senso orario.

I kernels utilizzati nello script di valutazione delle opportunità di occultazione sono gli stessi utilizzati per Juno con la sostituzione del kernel della missione Juno con un kernel relativo alla missione Europa Clipper: *europa_clipper_13-F7_scpse_ICEE.bsp* (spice ID = -650). In questo caso il kernel copre tutta la missione.

Va precisato che lo scopo della previsione delle opportunità di occultazione su una missione del genere è finalizzato a correggere l'errore di indecisione sul doppler shift che i segnali in downlink portano con sé arrivando alle stazioni a Terra durante le investigazioni di gravity science. Essendo le

rilevazioni concomitanti con i sorvoli di Europa ha poco senso studiare approfonditamente ciò che accade prima del flyby di Europa del 25 marzo 2029, 18:14, il primo del kernel. L'analisi comincerà dunque da qui.

Con un grafico di insieme su tutto il periodo di tempo che va dal 25 marzo 2029 al 30 maggio 2030, ci si rende conto della presenza di grappoli di occultazioni ravvicinate, tra di loro equispaziati come nel caso di Juno, e come intensità raramente sopra valori di $\Delta f = 0.002 \text{ Hz}$ (figura 39). Facendo riferimento alla tabella **TAB.3**, e considerando che l'orbita denominata 31 è in realtà più di un'orbita e contiene due gruppi di occultazioni, la presenza di 30 zone non nulle di TEC (figura 38) tra orbita 8 ed orbita 36 conferma (ancora una volta come nel caso di Juno) che su ogni ellisse ci sia una regione notevole sottoposta ad occultazione.

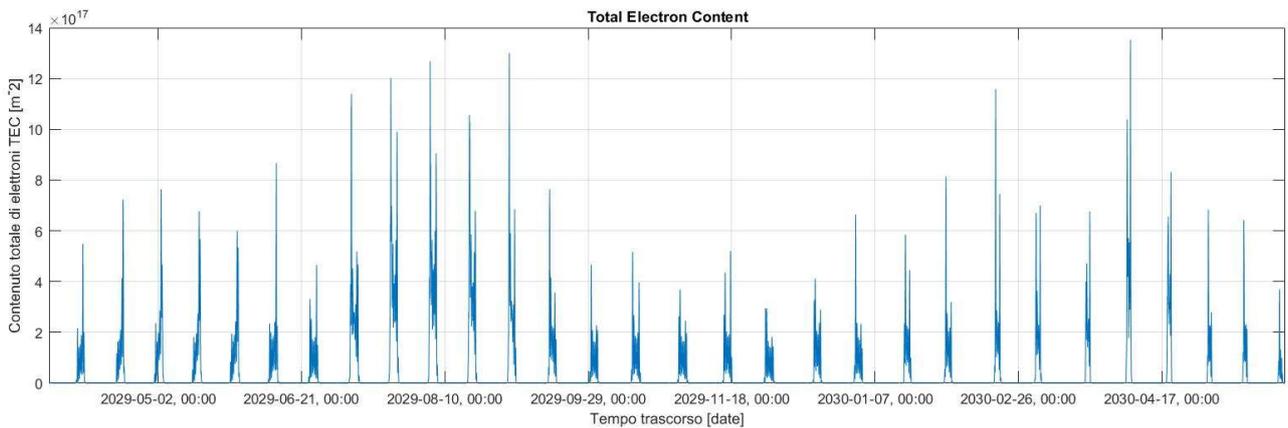


Figura 38: Profilo di TEC tra 25/03/2029, 00:00 e 30/05/2030, 00:00.

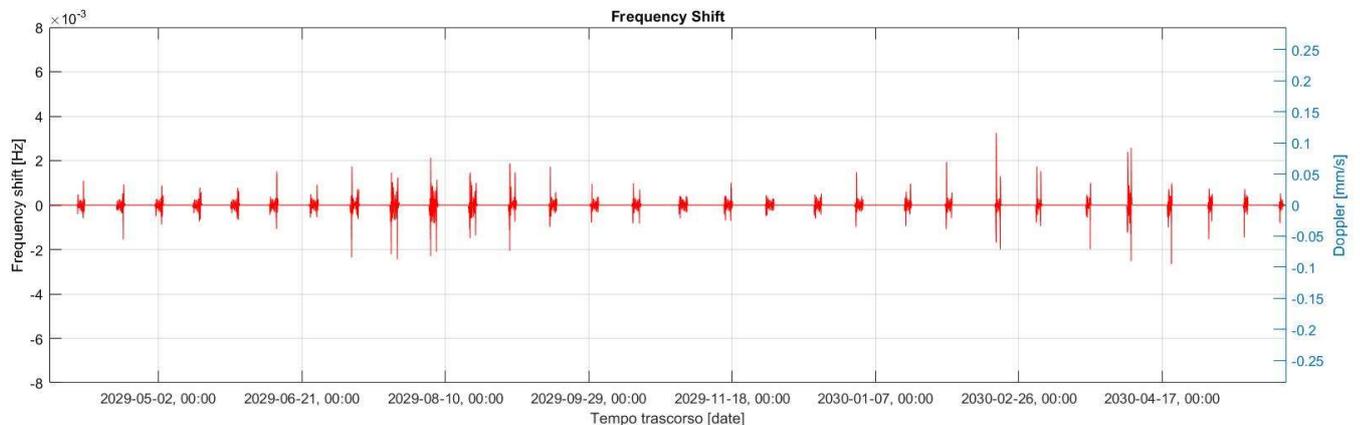


Figura 39: Profilo di frequency shift tra 25/03/2029, 00:00 e 30/05/2030, 00:00.

Orbita 9 Prendendo una delle prime orbite della science phase come modello del fenomeno in studio, la numero 9 con perigio il 23 aprile 2029 alle 05:18 (figura 40), è possibile vedere in quale punto dell'orbita si abbia il gruppo di occultazioni. In questo caso le ellissi sono praticamente equatoriali, dunque è impossibile fare previsioni a priori su cosa accadrà; è necessario conoscere la posizione della Terra per poter giustificare la zona interessata dal frequency shift non nullo. In vista di ciò, considerando che piano centrifugo ed equato-

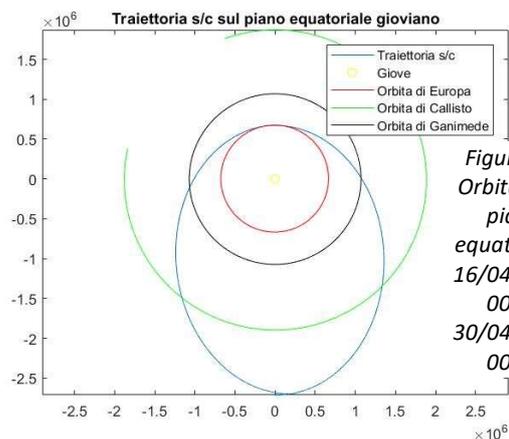


Figura 40: Orbita 9 sul piano equatoriale. 16/04/2029, 00:00 - 30/04/2029, 00:00

riale hanno un'inclinazione reciproca molto piccola (6.4 gradi), può essere interessante fare un grafico che proietti sul piano equatoriale traiettoria della sonda e congiungenti sonda-Terra durante l'orbita 9 (figura 43).

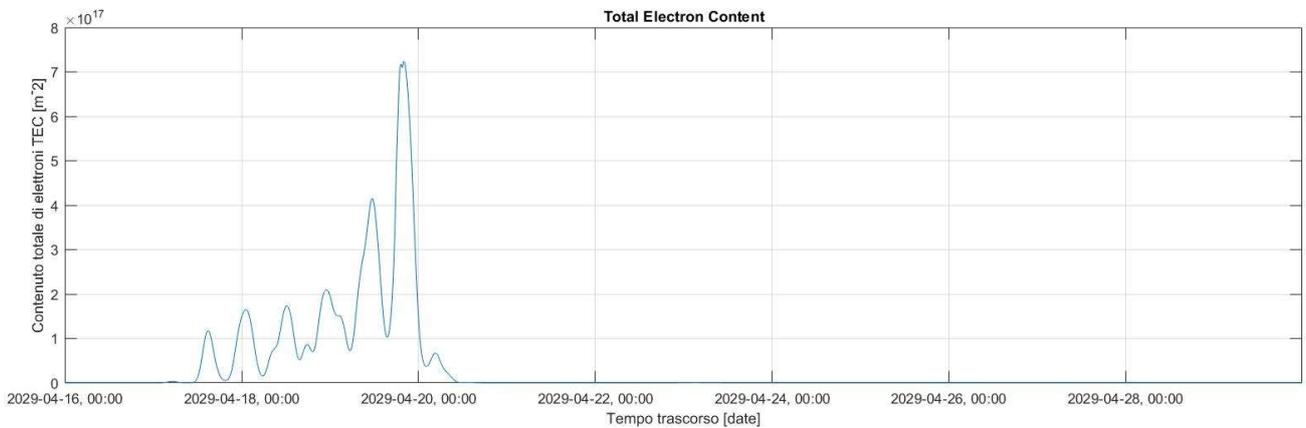


Figura 41: Profilo di TEC tra 16/04/2029, 00:00 e 30/04/2029, 00:00.

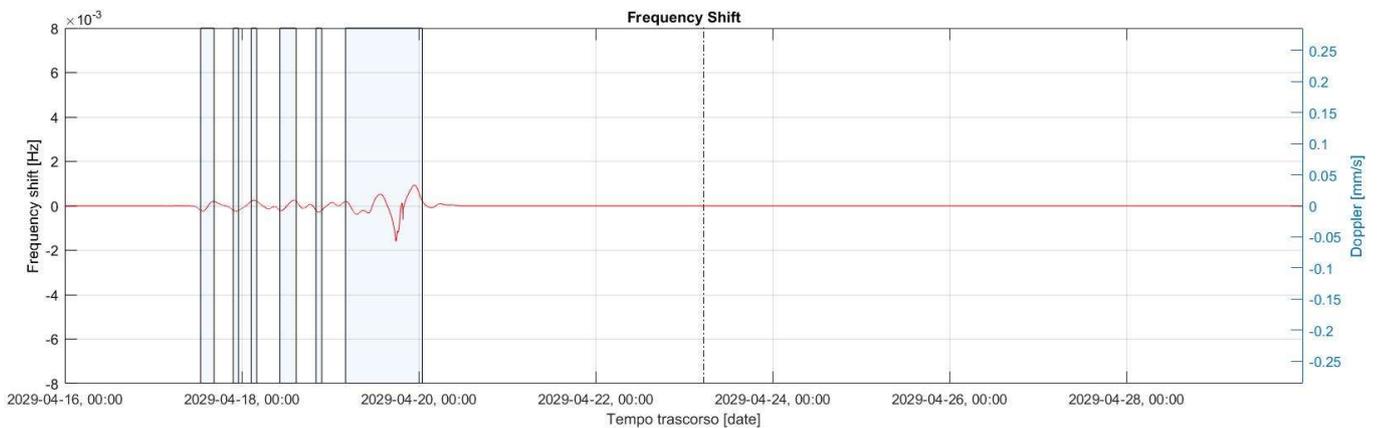


Figura 42: Profilo di frequency shift tra 16/04/2029, 00:00 e 30/04/2029, 00:00. La linea tratteggiata rappresenta il perigio p9.

Si può, per essere corretti anche da un punto di vista formale, riutilizzare anche il grafico della traiettoria della sonda, Giove e IPT nel riferimento JUPITER_CENTRIFUGAL (figura 44); la conferma

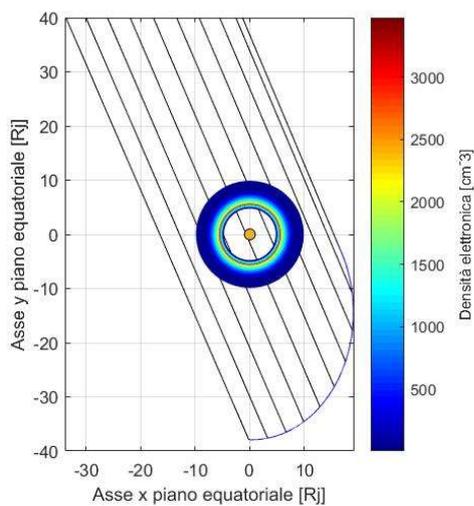


Figura 43: Grafico con traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) ed IPT sul piano equatoriale. N.B. L'IPT non avrebbe esattamente quella geometria sul piano equatoriale. Il grafico va dal 16/04/29, 00:00 al 22/04/29, 00:00.

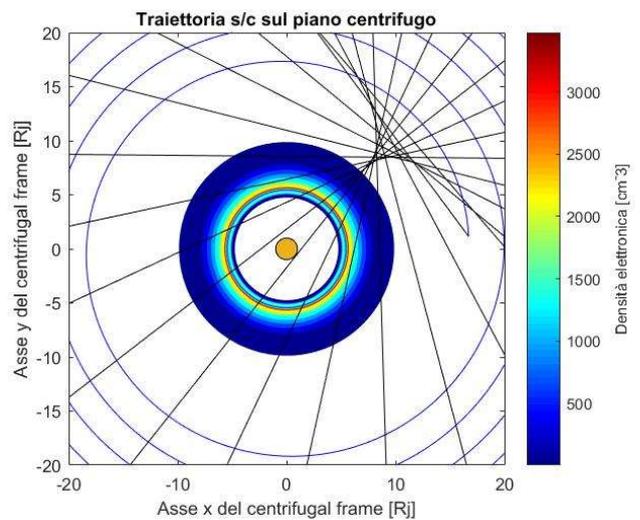


Figura 44: Grafico con traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione), ed IPT nel riferimento JUPITER_CENTRIFUGAL dal 16/04/29, 00:00 al 22/04/29, 00:00.

geometrica dell'occultazione c'è, ma non è possibile localizzare in modo assoluto la posizione della Terra essendo JUPITER_CENRIFUGAL rotante con IAU_JUPITER. Per questo, anche se non corretto da un punto di vista formale essendo l'IPT sul piano centrifugo e non su quello equatoriale, un grafico come quello di figura 43 è in realtà molto eloquente.

Orbita 35 L'orbita 35 ha perigio il 14 maggio 2030, 19:24, e se ne ottiene un buon grafico tra il 07/05/2030, 00:00 e il 21/05/2030, 00:00 (figura 45). Essendo passato poco più di un anno dall'orbita

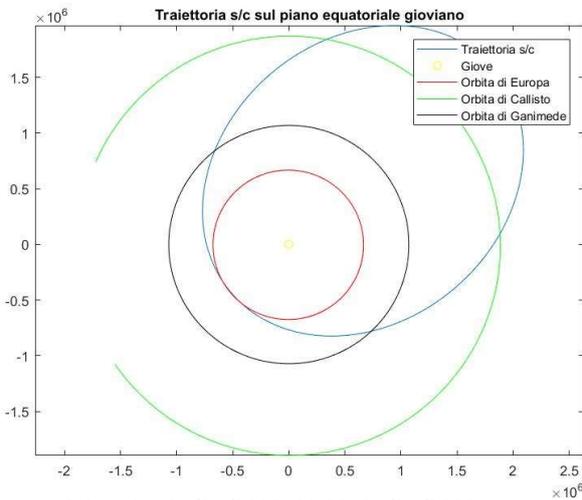


Figura 45: Orbita 35, 07/05/2030, 00:00, 21/05/2030, 00:00.

9 è ragionevole pensare che la posizione reciproca di Terra e Giove sia circa la stessa a livello di direzione delle congiungenti proiettate sul piano equatoriale. Esattamente come per l'esempio di cui prima ci si serve di un grafico improprio ma eloquente che riporta una proiezione sul piano equatoriale gioviano dell'IPT, come se piano centrifugo ed equatoriale avessero la stessa inclinazione reciproca (figura 48). Sono riportate anche le congiungenti Terra-sonda ed è immediato giustificare perché le occultazioni si raccolgano in un punto che nell'ellisse non è più vicino all'apogio, ma questa volta di poco segue il perigio (figura 46).

La scelta di studiare seconda e penultima orbita di una fase molto regolare della missione in cui la geometria delle orbite si modifica molto dolcemente nel tempo è motivata dal fatto che sia facile

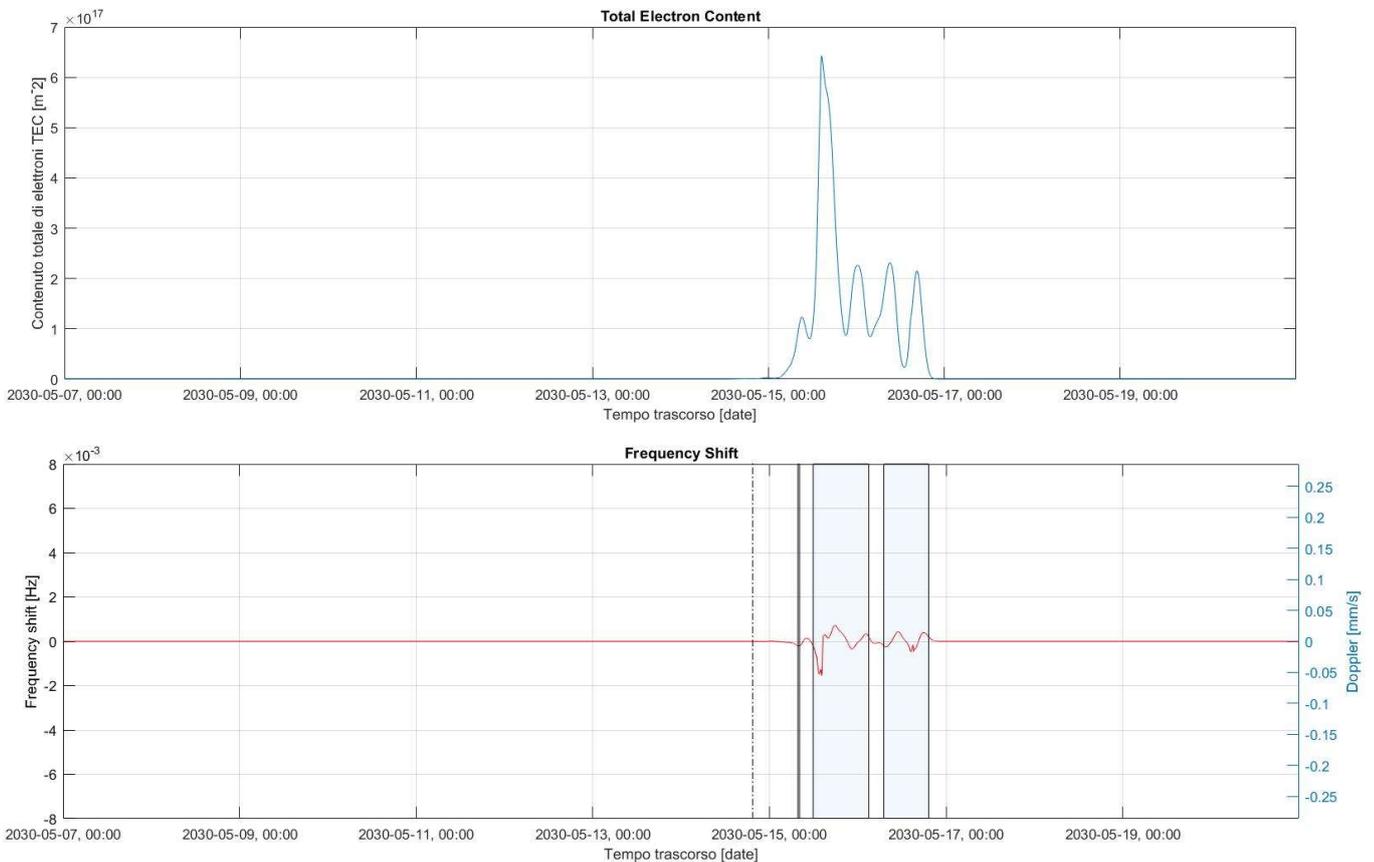


Figura 46: Andamento di TEC (IN ALTO) e del frequency shift (IN BASSO) tra 07/05/2030, 00:00 e 21/05/2030, 00:00. La linea tratteggiata verticale rappresenta il perigio 35.

intuire come le due situazioni analizzate nel dettaglio siano condizioni estremanti dello spostamento graduale del raggruppamento di occultazioni da apogio a perigio andando dall'orbita 10 verso l'orbita 35.

Per completezza e coerenza con quanto visto per l'orbita 9 si riporta anche il grafico delle congiungenti Terra-sonda sul piano centrifugo nel riferimento rotante JUPITER_CENTIFUGAL per l'orbita 35 (figura 47).

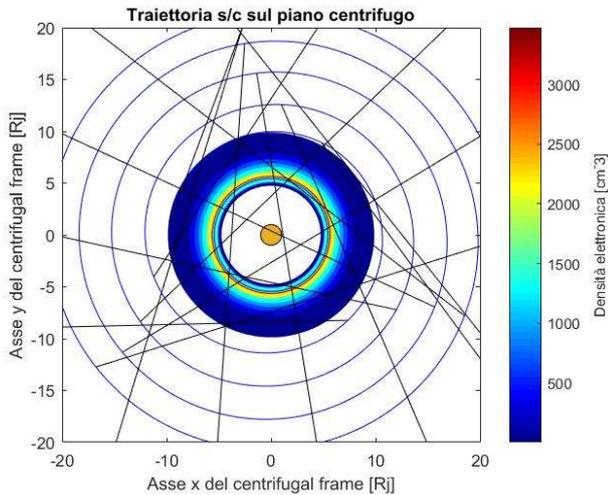


Figura 47: Traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) ed IPT tra 15/05/2030, 00:00 e 17/05/2030, 00:00 nel riferimento JUPITER_CENTIFUGAL.

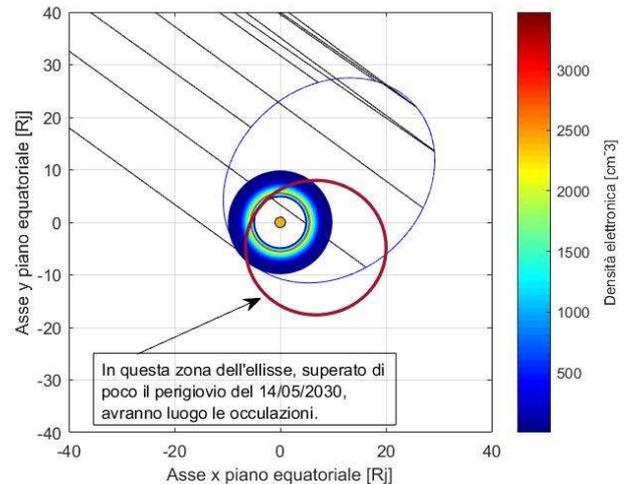


Figura 48: Traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) e IPT tra 07/05/2030, 00:00 e 21/05/2030, 00:00.

Fase di capovolgimento

Subito dopo il perigio del 27 maggio 2030 la fase di capovolgimento è caratterizzata da due momenti: un ampliamento delle orbite unito ad un aumento di inclinazione, e poi un restringimento dalla parte opposta e calo di inclinazione.

Nel primo momento sarebbe non corretto parlare di una TEC nulla, ma di fatto il suo ordine di grandezza è sempre di qualche unità più piccolo rispetto al 10^{17} [m⁻²] osservato nelle orbite precedenti.

Orbita 40 Il perigio di riferimento è questa volta il 13 luglio 2030, 10:51. Il grafico della TEC rivela la presenza di un integrale di contenuto elettronico sulla linea di vista non nullo, ma di tre ordini

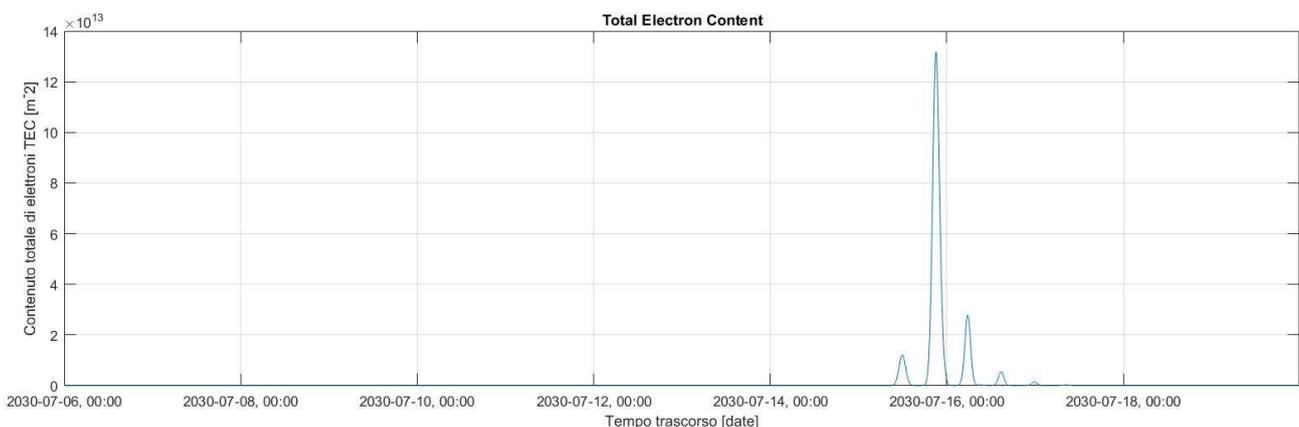


Figura 49: Profilo di TEC tra 06/06/2030, 00:00 e 20/07/2030, 00:00.

di grandezza inferiore a quanto visto per orbita 9 ed orbita 35 (figura 49). Il frequency shift corrispondente è inferiore alla soglia imposta perché si possa parlare di occultazione, dunque non vi è occultazione durante orbita 40. Giustificare l'assenza di occultazione è in questo caso più complicato di prima, poiché la geometria delle congiungenti proiettata sul piano equatoriale in denuncia un attraversamento del toro (figura 50). Intuitivamente tuttavia si può vedere nella pronunciata inclinazione dell'ellisse la ragione di una debolissima intersezione tra segnali e plasma in questa orbita. La zona che proiettata sul piano equatoriale avrebbe potuto dare luogo ad occultazioni in una prospettiva 3D si scopre possedere già una quota intorno a $2 * 10^5 km$, che corrispondono a circa $2.8R_j$ (figura 51).

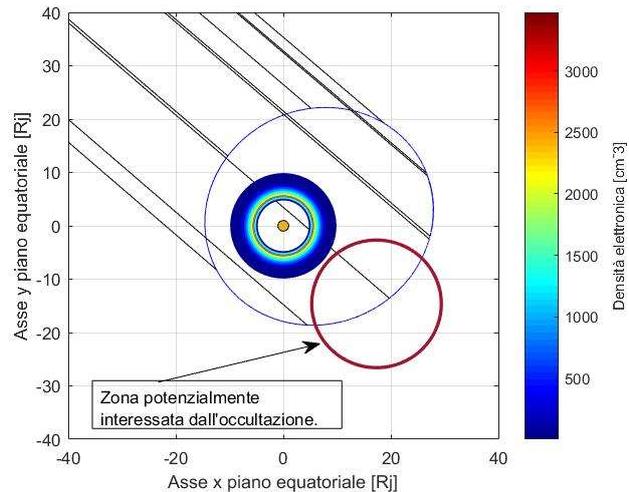


Figura 50: Aspettativa di occultazione limitata ad un approccio piano al problema durante l'orbita 40 (06/07/2030, 00:00, 20/07/2030, 00:00).

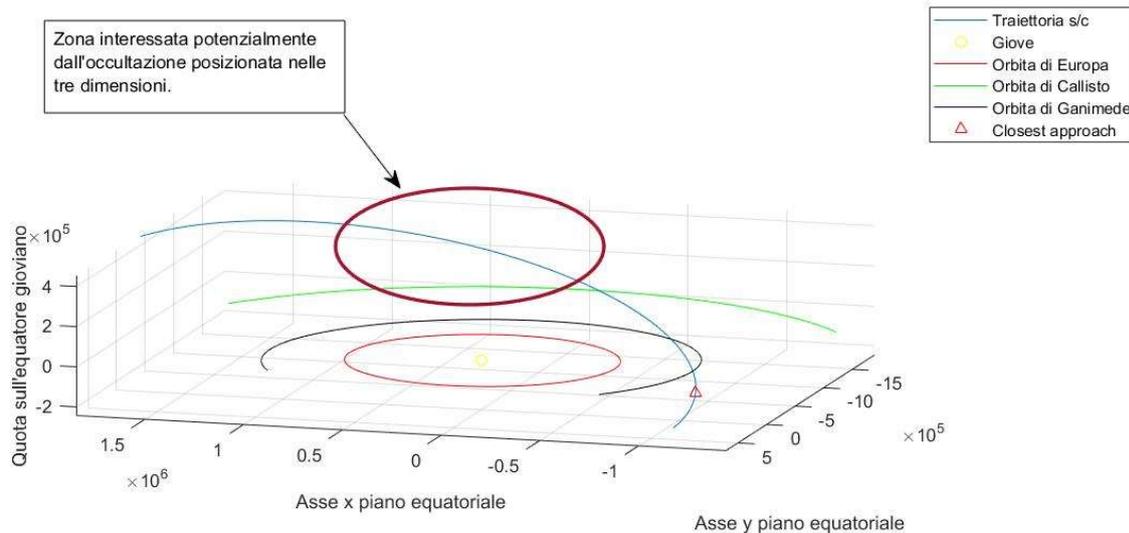


Figura 51: Porzione di Orbita 40, particolare della regione che sul piano equatoriale sarebbe potuta sembrare zona di occultazione (ellisse bordeaux).

Orbita 46 Senza che ancora il capovolgimento sia completato e il nuovo perigio sia tornato sulla traiettoria di Europa 180 gradi più avanti rispetto alla posizione del perigio 36 le ellissi cominciano a farsi più strette e meno inclinate rispetto all'orbita 40; cominciano ora a presentarsi lungo la missione delle occultazioni molto intense e fortemente localizzate, che continueranno fino al *deorbiting* di Europa Clipper.

L'orbita 46 è un ottimo esempio di ciò. Si tratta di un'ellisse con perigio (8 ottobre 2030, 09:58) leggermente più esterno rispetto alla traiettoria di Europa, e con un'inclinazione praticamente nulla sul piano equatoriale (figura 52). Questa volta la geometria del problema proiettata sul piano dell'equatore gioviano non può mentire, ed è facile giustificare la presenza di occultazioni. La loro forte intensità è giustificata dalla quasi completa assenza di inclinazione dell'orbita, probabilmente

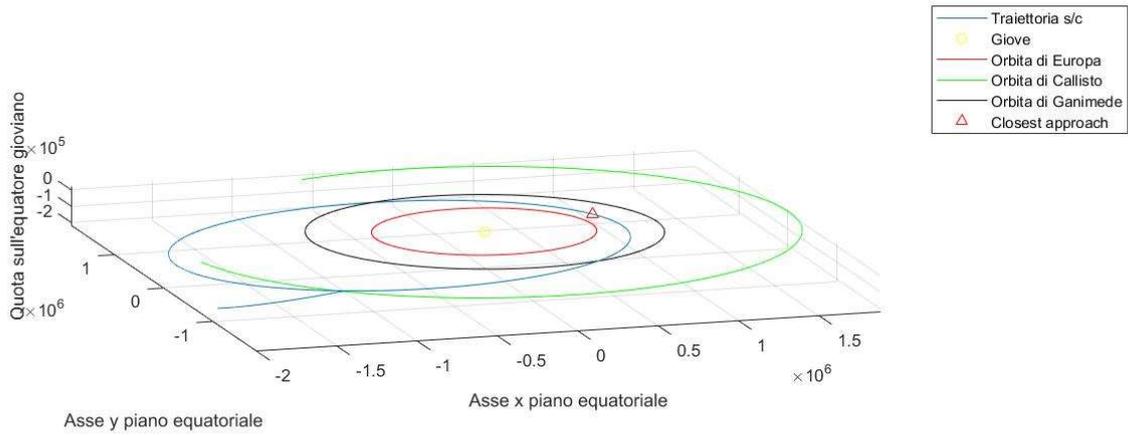


Figura 52: Orbita 46, traiettoria compresa tra il 03/10/2030, 00:00 e il 16/10/2030, 00:00. Da notare la posizione ancora esterna del perigio e l'inclinazione quasi nulla dell'ellisse.

combinata con un'orientazione del toro particolarmente favorevole ad una intersezione delle congiungenti Terra-sonda con le regioni a più alto contenuto di plasma (quelle più interne).

Il frequency shift raggiunge picchi ancora mai raggiunti nemmeno da Juno di 0.0058 e -0.0069 Hz, ed aumenterà ancora andando avanti nella missione (figura 53). La zona di occultazione precede di

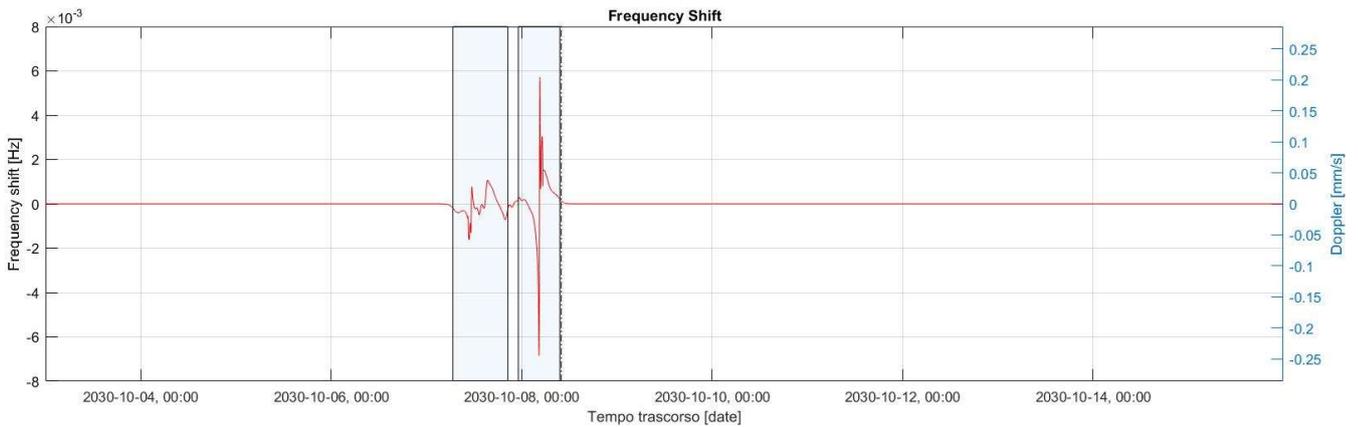


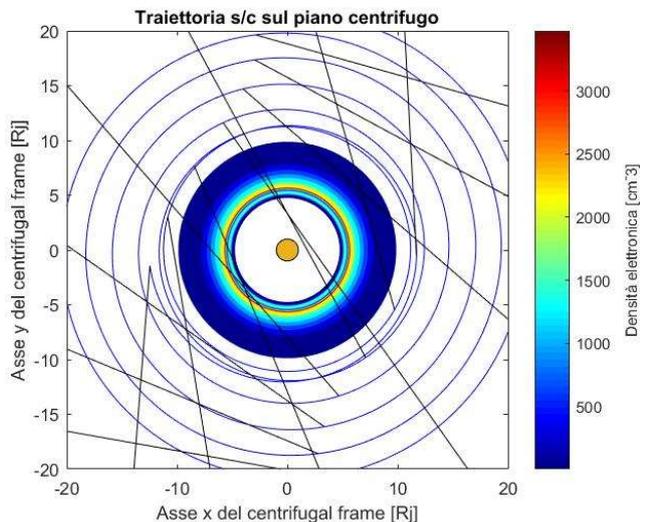
Figura 53: Profilo di frequency shift dal 03/10/2030, 00:00 al 16/10/2030, 00:00.

pochissimo il perigio, e il grafico delle congiungenti Terra-sonda lo conferma (figura 54).

Con il perigio 49 (10 novembre 2030, 20:37) dopo poco più di cinque mesi la sonda torna a lambire l'orbita di Europa, e comincia l'ultima fase della missione.

La struttura delle ellissi è del tutto analoga a quanto visto prima della fase di capovolgimento, e lo stesso vale per le occultazioni. La

Figura 54: Traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) e IPT tra 06/10/2030 e 09/10/2030.



posizione della Terra rispetto al sistema gioviano decreterà la zona che di ogni orbita sarà interessata da un gruppo di occultazioni; questa zona traslerà in modo graduale di ellisse in ellisse muovendosi tra le condizioni estremanti di orbita 49 e orbita 75.

Orbita 67 Invece che affrontare la coppia di orbite 50 e 74, abbastanza canoniche nei risultati, è più interessante indagare il perigio 67 (24 giugno 2031, 18:51); si tratterà di una condizione intermedia tra le due estremanti come geometria del problema (figura 55), ma la cosa unica è che si tratta dell'ellisse dove si registra il picco di frequency shift più intenso di tutta la missione (e di qualunque occultazione registrata su Juno): 0.0084 Hz.

I profili temporali di TEC e frequency shift sono forniti con un piccolo zoom sulla zona di occultazione, per avere un'immagine più dettagliata dell'occultazione più intensa di tutte e due le missioni studiate nell'elaborato (figura 56).

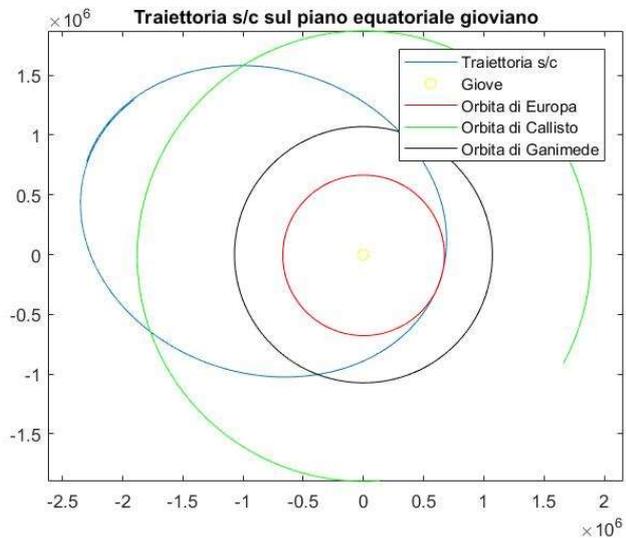


Figura 55: Orbita 67, traiettoria dal 17/06/2031, 00:00 al 01/07/2031, 00:00.

Per concludere sono stati riportati i classici grafici con le congiungenti Terra-sonda e l'IPT, sia nella versione meno corretta ma efficace per capire la geometria del problema (figura 57), che nella versione relativa al riferimento rotante JUPITER_CENTRIFUGAL (figura 58).

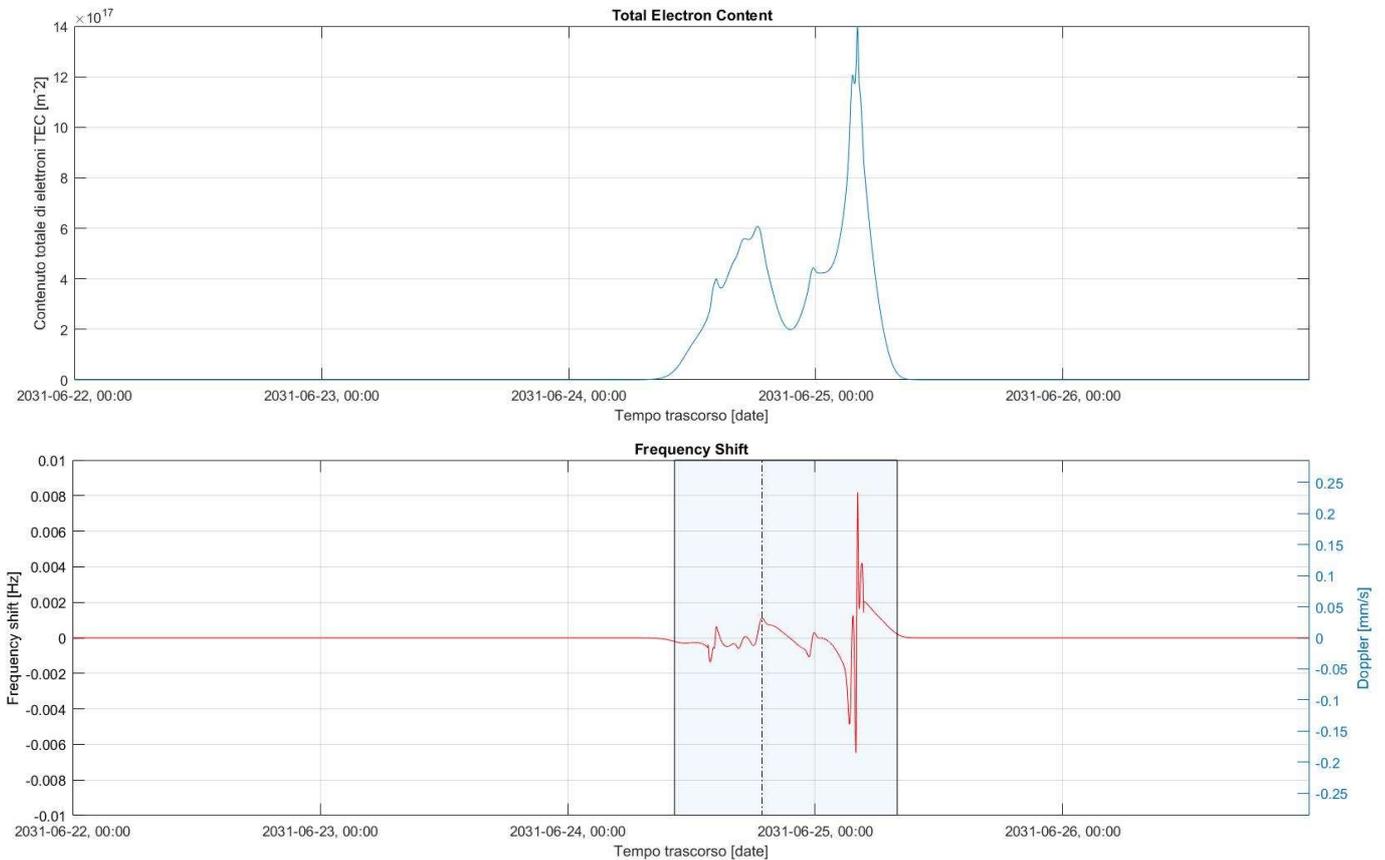


Figura 56: Profili di TEC e frequency shift tra 22/06/2031, 00:00 e 27/06/2031, 00:00.

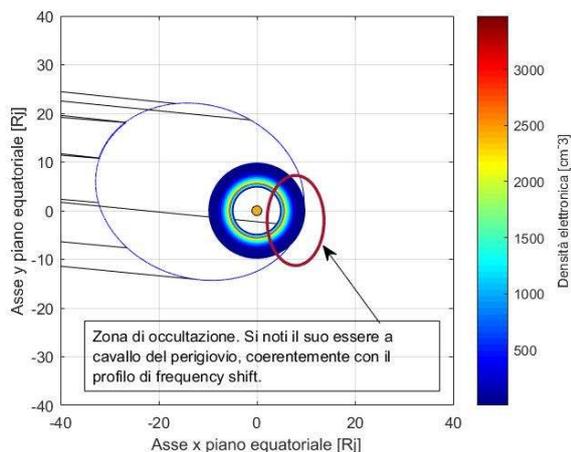


Figura 57: Traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) e IPT tra 17/06/2031 e 01/07/2031.

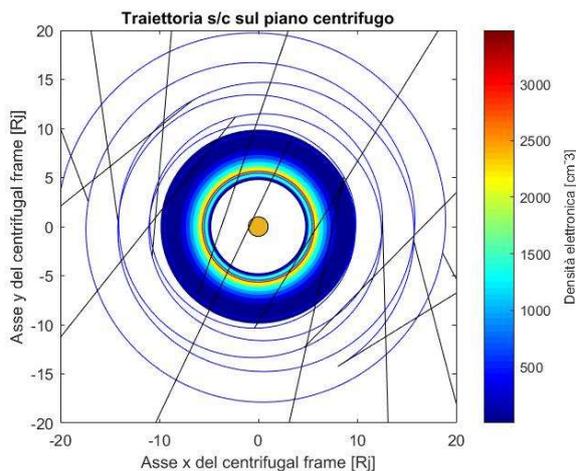


Figura 58: Traiettoria della sonda (blu), congiungenti Terra-sonda (nero), Giove (arancione) e IPT tra 23/06/2031 e 26/06/2031.

Tabella con dati quantitativi circa le occultazioni Di seguito è allegata la tabella **TAB.3** contenente tutti i dati relativi alle diverse occultazioni presentatesi tra 15/03/2028, 13:33 e 10/10/2031, 09:58, date di inizio e fine del kernel relativo alla missione Europa Clipper. Le voci sono le stesse della tabella relativa a Juno, dunque date di inizio e fine, picco massimo e minimo di frequency shift, valore massimo di path delay e durata in secondi.

Alcune considerazioni fatte durante la ricostruzione della traiettoria della sonda sono state inserite tra le righe della tabella, notifiche di flyby di satelliti naturali di Giove, allargamenti o restringimenti di orbita, forti cambi di inclinazione, nonché momenti importanti nello svolgersi di Europa Clipper: la fine dell'approccio a Giove, l'inizio della science phase, la fase di capovolgimento, e così via. In blu sono state evidenziate le orbite menzionate come orbite modello nella precedente trattazione.

TAB.3					
Inizio Occultazione	Fine occultazione	Massimo frequency shift positivo [Hz]	Massimo frequency shift negativo [Hz]	Massimo path delay [cm]	Durata [s]
Avvicinamento e ingresso in orbita gioviana 15 marzo 2028 => 4 aprile 2028, 01:52 TDB (closest approach)					
Fase di riduzione del periodo e modifica dell'inclinazione del piano orbitale verso quello equatoriale					
Orbita ellittica 1 4 aprile 2028, 01:52 => 22 ottobre 2028, 03:32					
05/04/2028 07:27	05/04/2028 12:57	$6.5510 * 10^{-4}$	$-4.6296 * 10^{-4}$	-14.1231	19800
06/04/2028 17:37	06/04/2028 22:22	$3.0511 * 10^{-4}$	$-3.4597 * 10^{-4}$	-8.5309	17100

Orbita ellittica 2
Inclinazione della traiettoria verso il piano equatoriale

22 ottobre 2028, 03:23 => 18 dicembre 2028, 06:18

Le righe evidenziate in grigio rappresentano le occultazioni principali per ogni orbita

25/10/2028 19:05	26/10/2028 19:22	0.0022	$-9.9459 * 10^{-4}$	-53.1625	87400
27/10/2028 23:22	27/10/2028 04:40	$2.3106 * 10^{-4}$	$-2.8440 * 10^{-4}$	-12.9371	19100
27/10/2028 16:50	27/10/2028 18:12	3.173310^{-4}	/	-13.2341	4900
28/10/2028 01:58	28/10/2028 23:07	0.0010	-0.0019	-43.3956	76100
29/10/2028 02:07	29/10/2028 03:17	/	$-2.4574 * 10^{-4}$	-7.8135	4200
29/10/2028 05:48	29/10/2028 06:30	$2.0662 * 10^{-4}$	/	-7.1302	2500

Orbita ellittica 3
Inclinazione della traiettoria verso piano equatoriale

18 dicembre 2028, 06:18 => 15 gennaio 2029, 18:13

24/12/2028 03:26	24/12/2028 04:01	$2.0880 * 10^{-4}$	/	-6.5637	2100
24/12/2028 07:15	25/12/2028 05:15	0.0010	$-9.3202 * 10^{-4}$	-34.3213	79200
25/12/2028 09:40	25/12/2028 11:42	$3.3210 * 10^{-4}$	/	-13.1562	7320
25/12/2028 17:17	25/12/2028 17:27	/	$-2.0182 * 10^{-4}$	-10.9136	600
25/12/2028 20:12	25/12/2028 21:42	$2.8438 * 10^{-4}$	/	-10.9062	5400
26/12/2028 02:55	26/12/2028 07:34	$2.2936 * 10^{-4}$	$-2.7649 * 10^{-4}$	-11.3849	16740
26/12/2028 12:57	26/12/2028 14:49	/	$-3.1245 * 10^{-4}$	-10.6831	6720
26/12/2028 20:08	27/12/2028 16:59	$8.5808 * 10^{-4}$	-0.0011	-31.6657	75060
27/12/2028 20:42	28/12/2028 01:19	$2.4204 * 10^{-4}$	$-2.2977 * 10^{-4}$	-7.8239	16620

Orbita ellittica 4
Brusca inclinazione dell'orbita e nessuna riduzione del periodo

15 gennaio 2029, 18:13 => 2 febbraio 2029

21/01/2029 21:28	22/01/2029 03:23	$3.4684 * 10^{-4}$	$-3.7576 * 10^{-4}$	-12.3248	21300
22/01/2029 06:13	22/01/2029 14:02	$4.5247 * 10^{-4}$	$-7.8225 * 10^{-4}$	-23.2909	28140
22/01/2029 16:53	22/01/2029 17:32	/	$-2.1031 * 10^{-4}$	-5.9589	2340
22/01/2029 22:23	23/01/2029 00:14	$2.9765 * 10^{-4}$	/	-9.9681	6660
23/01/2029 05:57	23/01/2029 10:25	$2.6539 * 10^{-4}$	$-2.2844 * 10^{-4}$	-9.2093	16080
23/01/2029 15:58	23/01/2029 20:22	$2.2359 * 10^{-4}$	$-2.5710 * 10^{-4}$	-8.9329	15840
24/01/2029 02:15	24/01/2029 03:52	/	$-2.7492 * 10^{-4}$	-8.2522	5820
24/01/2029 12:33	24/01/2029 19:49	$5.3125 * 10^{-4}$	$-3.4541 * 10^{-4}$	-16.5510	26160
24/01/2029 23:16	25/01/2029 04:39	$3.4058 * 10^{-4}$	$-3.0489 * 10^{-4}$	-10.4978	19380

Orbita ellittica 5

02 febbraio 2029, 22:13 => 27 febbraio 2029, 00:35

/	/	/	/	/	/
---	---	---	---	---	---

Orbita ellittica 6					
Riduzione dell'inclinazione e del periodo orbitale					
27 febbraio 2029, 00:35 => 13 marzo 2029 10:02					
07/03/2029 13:32	07/03/2029 18:48	$4.6678 * 10^{-4}$	$-3.9315 * 10^{-4}$	-12.7188	18960
08/03/2029 22:38	08/03/2029 23:43	/	$-2.3246 * 10^{-4}$	-6.5487	3900
09/03/2029 08:48	09/03/2029 15:32	$6.7228 * 10^{-4}$	$-8.8780 * 10^{-4}$	-23.1971	24240
Orbita ellittica 7					
13 marzo 2029, 10:02 => 25 marzo 2029, 18:14					
21/03/2029 14:25	21/03/2029 21:07	$8.7880 * 10^{-4}$	$-6.6193 * 10^{-4}$	-21.5740	24120
22/03/2029 00:22	22/03/2029 00:52	/	$-2.0708 * 10^{-4}$	-4.6912	1800
22/03/2029 05:59	22/03/2029 07:43	$2.7749 * 10^{-4}$	/	-10.4283	6240
22/03/2029 13:13	22/03/2029 17:49	$2.2227 * 10^{-4}$	$-2.6220 * 10^{-4}$	-10.6758	16560
22/03/2029 23:17	23/03/2029 01:46	/	$-3.4353 * 10^{-4}$	-13.3989	8940
23/03/2029 04:59	23/03/2029 17:06	$6.2798 * 10^{-4}$	$-7.5080 * 10^{-4}$	-24.2148	43620
SCIENCE PHASE					
Orbita 8					
Più o meno a cavallo del perigio si ha un flyby di Europa.					
Ogni orbita è leggermente ruotata rispetto alla precedente in modo tale che ad ogni perigio il passaggio della sonda sia vicino al passaggio di Europa lungo la sua orbita.					
Durata orbite di circa 14 giorni					
25 marzo 2029, 18:14 => 8 aprile 2029 23:52					
03/04/2029 20:29	04/04/2029 02:03	$4.8975 * 10^{-4}$	$-4.1978 * 10^{-4}$	-12.3427	20040
04/04/2029 11:21	04/04/2029 12:43	$2.3417 * 10^{-4}$	/	-7.5334	4320
04/04/2029 18:54	04/04/2029 23:18	$2.3720 * 10^{-4}$	$-2.3328 * 10^{-4}$	-8.6982	15840
05/04/2029 04:52	05/04/2029 06:40	/	$-2.8952 * 10^{-4}$	-9.9374	6480
05/04/2029 12:10	06/04/2029 07:42	0.0011	$-6.0941 * 10^{-4}$	-31.3602	70320
Orbita 9					
Da questo momento le orbite verranno considerate di 14 giorni e non verranno più definite da perigio a perigio, così da mettere meglio in evidenza il posizionamento dell'occultazione rispetto al perigio.					
Si cercherà di avere il perigio più o meno a metà orbita.					
Fino al 16 aprile 2029 non ci sono occultazioni, dunque considereremo orbita 8 la prima orbita della science phase, e la seconda sarà definita nei 14 giorni dopo il 16 aprile 2029.					
Pj9 = 23 aprile 2029, 05:18					
17/04/2029 12:50	17/04/2029 16:30	$2.0265 * 10^{-4}$	$-2.3795 * 10^{-4}$	-6.7042	13200
17/04/2029 21:39	17/04/2029 23:09	/	$-2.4288 * 10^{-4}$	-8.4254	5400
18/04/2029 02:29	18/04/2029 04:05	$2.5456 * 10^{-4}$	/	-8.7708	5760
18/04/2029 10:19	18/04/2029 14:48	$2.6111 * 10^{-4}$	$-2.1961 * 10^{-4}$	-9.8847	16140

18/04/2029 20:06	18/04/2029 21:42	/	$-2.9264 * 10^{-4}$	-10.9628	5760
19/04/2029 04:04	20/04/2029 01:00	$9.3695 * 10^{-4}$	-0.0016	-41.2987	75360
Orbita 10					
Pj10 = 7 maggio 2029, 11:17					
01/05/2029 03:03	01/05/2029 09:06	$2.7222 * 10^{-4}$	$-5.1528 * 10^{-4}$	-13.5105	21780
01/05/2029 18:33	01/05/2029 20:05	$2.5971 * 10^{-4}$	/	-9.0739	5520
02/05/2029 01:38	02/05/2029 06:16	$2.3285 * 10^{-4}$	$-2.6022 * 10^{-4}$	-11.3361	16680
02/05/2029 11:33	02/05/2029 13:20	/	$-3.2509 * 10^{-4}$	-13.6094	6420
02/05/2029 18:19	03/05/2029 16:08	$9.0375 * 10^{-4}$	$-9.1142 * 10^{-4}$	-43.6344	78540
Orbita 11					
Pj11 = 21 maggio 2029, 19:02					
<p>Visto che si sta passando da un'orbita all'altra in corrispondenza dell'apogio il fatto di avere occultazioni in prossimità delle estremità temporali studiate significa che le occultazioni tendono a presentarsi proprio all'apogio dell'orbita. In vista di ciò d'ora in avanti distingueremo le orbite dalle successive non proprio all'apogio ma un po' prima. Considereremo questa orbita 11 dal 12 maggio invece che dal 14 al 26 maggio invece che al 28, in modo tale l'occultazione all'apogio risulti nell'orbita 12.</p>					
14/05/2019 08:37	14/05/2019 14:41	$2.4501 * 10^{-4}$	$-3.7387 * 10^{-4}$	-10.3963	21840
15/05/2029 00:12	15/05/2029 01:37	$2.5775 * 10^{-4}$	/	-8.2254	5100
15/05/2029 07:14	15/05/2029 11:50	$2.3504 * 10^{-4}$	$-2.5946 * 10^{-4}$	-11.186	16560
15/05/2029 17:07	15/05/2029 18:54	/	$-3.3578 * 10^{-4}$	-12.3859	6420
16/05/2029 00:03	16/05/2029 21:59	$8.0978 * 10^{-4}$	$-9.8860 * 10^{-4}$	-38.6345	78960
Orbita 12					
Pj12 = 5 giugno 2029. 01:01					
27/05/2029 14:02	27/05/2029 20:29	$2.6668 * 10^{-4}$	$-3.6834 * 10^{-4}$	-11.1432	23220
28/05/2029 05:46	28/05/2029 07:16	$2.6261 * 10^{-4}$	/	-9.2240	5400
28/05/2029 12:51	28/05/2029 17:24	$2.3967 * 10^{-4}$	$-2.6665 * 10^{-4}$	-10.8451	16380
28/05/2029 22:45	29/05/2029 00:35	/	$-3.3290 * 10^{-4}$	-12.5533	6600
29/05/2029 05:46	30/05/2029 03:22	$7.8592 * 10^{-4}$	$-8.9557 * 10^{-4}$	-34.2318	77760
Orbita 13					
Pj13 = 19 giugno 2029, 06:16					
09/06/2029 20:01	10/06/2029 02:08	$4.4619 * 10^{-4}$	$-4.4032 * 10^{-4}$	-13.4066	22020
10/06/2029 05:20	10/06/2029 07:30	/	$-3.0633 * 10^{-4}$	-10.7200	7800
10/06/2029 10:24	10/06/2029 12:32	$2.9583 * 10^{-4}$	/	-10.6373	7680
10/06/2029 21:28	10/06/2029 22:56	$2.7211 * 10^{-4}$	/	-9.4184	5280
11/06/2029 04:25	11/06/2029 05:45	/	$-2.7457 * 10^{-4}$	-9.6610	4800
11/06/2029 08:18	11/06/2029 08:50	$2.1168 * 10^{-4}$	/	-9.6266	1920
11/06/2029 14:24	11/06/2029 16:31	/	$-3.3809 * 10^{-4}$	-12.6302	7620
11/06/2029 20:43	12/06/2029 17:35	0.0016	-0.0011	-49.9552	75120

Orbita 14					
Pj14 = 3 luglio 2029, 12:40					
23/06/2029 21:01	24/06/2029 14:08	$6.0102 * 10^{-4}$	$-5.7455 * 10^{-4}$	-18.9238	61620
24/06/2029 22:46	25/06/2029 00:23	$2.7673 * 10^{-4}$	/	-9.7781	5820
25/06/2029 06:01	25/06/2029 10:22	$2.2619 * 10^{-4}$	$-2.5419 * 10^{-4}$	-9.4556	15660
25/06/2029 16:08	25/06/2029 17:54	/	$-2.8916 * 10^{-4}$	-9.0886	6360
25/06/2029 22:56	25/06/2029 23:41	$2.1565 * 10^{-4}$	/	-7.0740	2700
26/06/2029 02:25	26/06/2029 10:14	$9.1962 * 10^{-4}$	$-5.5539 * 10^{-4}$	-26.5657	28140
26/06/2029 13:26	26/06/2029 18:21	$2.6031 * 10^{-4}$	$-2.5163 * 10^{-4}$	-8.6121	17700
Orbita 15					
Pj15 = 17 luglio 2029. 17:51					
07/07/2029 21:52	09/07/2029 01:54	0.0018	-0.0025	-65.0317	100920
09/07/2029 17:26	09/07/2029 18:16	/	$-2.3459 * 10^{-4}$	-14.0859	3000
09/07/2029 23:31	10/07/2029 21:18	$7.3493 * 10^{-4}$	$-8.1714 * 10^{-4}$	-29.6105	78420
Orbita 16					
Pj16 = 31 luglio 2029, 23:43					
21/07/2029 17:50	23/07/2029 03:11	0.0016	-0.0023	-68.6134	120060
23/07/2029 09:32	24/07/2029 13:45	0.0012	-0.0027	-56.6307	101580
Orbita 17					
Pj17 = 15 agosto 2029, 07:24					
04/08/2029 10:09	05/08/2029 19:10	0.0022	-0.0027	-73.0351	118860
06/08/2029 00:34	07/08/2029 05:11	0.0012	-0.0023	-51.8088	103020
Orbita 18					
Pj18 = 29 agosto 2029, 13:29					
18/08/2029 05:14	19/08/2029 10:12	0.0016	-0.0018	-60.2805	104280
19/08/2029 16:50	20/08/2029 20:21	0.0010	-0.0015	-38.7609	99060
Orbita 19					
Pj19 = 12 settembre 2029, 19:00					
01/09/2029 02:17	01/09/2029 03:54	/	$-2.8904 * 10^{-4}$	-9.9386	5820
01/09/2029 06:33	02/09/2029 01:10	0.0022	-0.0024	-74.5097	67020
02/09/2029 15:34	02/09/2029 18:41	$2.2095 * 10^{-4}$	$-2.4684 * 10^{-4}$	-13.5099	11220
02/09/2029 23:23	03/09/2029 12:21	0.0015	$-7.7302 * 10^{-4}$	-39.2113	46680
03/09/2029 15:08	03/09/2029 19:40	$2.2692 * 10^{-4}$	$-2.1993 * 10^{-4}$	-8.0032	16320

Orbita 20

Pj20 = 26 settembre 2029, 23:58

15/09/2029 08:57	16/09/2029 06:02	0.0018	$-9.8854 * 10^{-4}$	-43.6128	75900
16/09/2029 12:33	16/09/2029 13:42	$2.5650 * 10^{-4}$	/	-12.2432	4140
16/09/2029 19:03	16/09/2029 20:39	/	$-2.9112 * 10^{-4}$	-11.4273	5760
17/09/2029 02:09	17/09/2029 13:27	$5.9736 * 10^{-4}$	$-3.7097 * 10^{-4}$	-20.3551	40680
17/09/2029 16:23	17/09/2029 21:39	$3.0265 * 10^{-4}$	$-2.7838 * 10^{-4}$	-9.8703	18960

Orbita 21

Pj21 = 11 ottobre 2029, 06:25

29/09/2029 21:12	30/09/2029 09:05	$9.8335 * 10^{-4}$	$-7.9068 * 10^{-4}$	-26.6435	42780
30/09/2029 12:47	30/09/2029 14:52	$3.1070 * 10^{-4}$	/	-11.5921	7500
30/09/2029 20:43	01/10/2029 01:00	$2.5230 * 10^{-4}$	$-2.2027 * 10^{-4}$	-9.3944	15420
01/10/2029 06:45	01/10/2029 08:08	/	$-2.6227 * 10^{-4}$	-9.1320	4980
01/10/2029 17:03	01/10/2029 19:26	/	$-3.0918 * 10^{-4}$	-11.8410	8580
01/10/2029 22:00	02/10/2029 00:27	$3.6995 * 10^{-4}$	/	-12.0773	8820
02/10/2029 03:55	02/10/2029 09:25	$3.7903 * 10^{-4}$	$-3.3843 * 10^{-4}$	-11.9118	19800

Orbita 22

Orbita più ampia delle precedenti, l'intervallo di definizione temporale è un po' più lungo, invece che i canonici 14 giorni si considerano 16 giorni, dal 12 al 28 ottobre 2029.

L'inclinazione di questa orbita è esattamente nulla rispetto al piano equatoriale di Giove

Pj22 = 27 ottobre 2029, 05:59

14/10/2029 08:29	14/10/2029 21:03	$9.9152 * 10^{-4}$	$-8.4027 * 10^{-4}$	-29.5438	45240
15/10/2029 00:00	15/10/2029 02:27	$3.5312 * 10^{-4}$	/	-12.4567	8820
15/10/2029 08:21	15/10/2029 08:26	/	$-2.0159 * 10^{-4}$	-9.6882	300
15/10/2029 11:02	15/10/2029 12:34	$2.7503 * 10^{-4}$	/	-9.2999	5520
15/10/2029 18:00	15/10/2029 22:24	$2.1372 * 10^{-4}$	$-2.6941 * 10^{-4}$	-10.0104	15840
16/10/2029 04:15	16/10/2029 06:19	/	$-3.0335 * 10^{-4}$	-11.0084	7440
16/10/2029 10:00	16/10/2029 11:50	$2.6951 * 10^{-4}$	/	-8.4596	6600
16/10/2029 14:40	16/10/2029 21:38	$7.0087 * 10^{-4}$	$-8.4464 * 10^{-4}$	-22.6771	25080

Orbita 23

Pj23 = 12 novembre 2029, 05:07

30/10/2029 12:25	31/10/2029 05:23	$4.0921 * 10^{-4}$	$-6.1281 * 10^{-4}$	-21.0559	61080
31/10/2029 07:58	31/10/2029 08:22	/	$-2.0505 * 10^{-4}$	-5.9878	1440
31/10/2029 13:50	31/10/2029 15:35	$2.8504 * 10^{-4}$	/	-10.4769	6300
31/10/2029 21:08	01/11/2029 01:39	$2.4460 * 10^{-4}$	$-2.4624 * 10^{-4}$	-9.3944	16260
01/11/2029 07:19	01/11/2029 08:55	/	$-2.7137 * 10^{-4}$	-8.2175	5760
01/11/2029 17:41	02/11/2029 00:59	$4.1375 * 10^{-4}$	$-3.2172 * 10^{-4}$	-14.0773	26280
02/11/2029 04:26	02/11/2029 09:56	$3.6271 * 10^{-4}$	$-3.2271 * 10^{-4}$	-11.2537	19800

Orbita 24

Pj24 = 26 novembre 2029, 11:51

15/11/2029 05:38	16/11/2029 01:50	$4.3075 * 10^{-4}$	$-7.0750 * 10^{-4}$	-24.9054	72720
16/11/2029 07:10	16/11/2029 08:58	$2.9782 * 10^{-4}$	/	-10.5605	6480
16/11/2029 14:21	16/11/2029 18:57	$2.4176 * 10^{-4}$	$-2.5989 * 10^{-4}$	-10.4317	16560
17/11/2029 00:27	17/11/2029 02:21	/	$-2.9751 * 10^{-4}$	-10.6575	6840
17/11/2029 07:16	17/11/2029 08:09	$2.2034 * 10^{-4}$	/	-6.2434	3180
17/11/2029 10:51	17/11/2029 18:30	0.0010	$-7.3694 * 10^{-4}$	-29.7038	27540

Orbita 25

Periodo ancora leggermente più lungo, ci aggiriamo intorno ai 18 giorni

Pj25 = 14 dicembre 2029, 07:39

29/11/2029 17:00	29/11/2029 23:43	$4.5349 * 10^{-4}$	$-4.9656 * 10^{-4}$	-16.7891	24180
30/11/2029 02:14	30/11/2029 10:00	$3.6148 * 10^{-4}$	$-4.8050 * 10^{-4}$	-16.8223	27960
30/11/2029 18:36	30/11/2029 20:10	$2.6726 * 10^{-4}$	/	-9.1841	5640
01/12/2029 01:58	01/12/2029 06:15	$2.3226 * 10^{-4}$	$-2.3440 * 10^{-4}$	-8.2708	15420
01/12/2029 12:17	01/12/2029 13:32	/	$-2.4079 * 10^{-4}$	-7.4239	4500
01/12/2029 22:46	02/12/2029 00:36	/	$-2.6887 * 10^{-4}$	-9.1779	6600
02/12/2029 03:17	02/12/2029 05:16	$3.0811 * 10^{-4}$	/	-9.7666	7140
02/12/2029 09:36	02/12/2029 14:14	$2.8362 * 10^{-4}$	$-2.4964 * 10^{-4}$	-8.3165	16680

Orbita 26

Pj26 = 28 dicembre 2029, 14:20

16/12/2029 15:54	17/12/2029 12:03	$4.7331 * 10^{-4}$	$-6.2958 * 10^{-4}$	-23.5634	72540
17/12/2029 17:53	17/12/2029 19:33	$2.9194 * 10^{-4}$	/	-11.7271	6000
18/12/2029 00:47	18/12/2029 02:16	/	$-2.7717 * 10^{-4}$	-10.7272	5340
18/12/2029 04:48	18/12/2029 05:18	$2.1107 * 10^{-4}$	/	-10.6885	1800
18/12/2029 11:03	18/12/2029 13:25	/	$-3.2467 * 10^{-4}$	-12.5502	8520
18/12/2029 16:22	18/12/2029 18:54	$3.5756 * 10^{-4}$	/	-13.1198	9120
18/12/2029 21:25	19/12/2029 04:05	$5.1250 * 10^{-4}$	$-5.6290 * 10^{-4}$	-16.4765	24000

Orbita 27

Periodo a 18 giorni, dal 30 dicembre 2029 al 17 gennaio 2030.

Pj27 = 15 gennaio 2030, 10:03

31/12/2029 02:36	31/12/2029 15:02	0.0015	$-9.9263 * 10^{-4}$	-37.9059	44760
31/12/2029 18:39	31/12/2029 20:54	$3.2831 * 10^{-4}$	/	-12.8242	8100
01/01/2030 02:20	01/01/2030 06:57	$2.6787 * 10^{-4}$	$-2.2870 * 10^{-4}$	-10.2859	16620
01/01/2030 12:28	01/01/2030 14:00	/	$-2.6919 * 10^{-4}$	-9.6806	5520
01/01/2030 22:57	02/01/2030 06:09	$4.0042 * 10^{-4}$	$-3.0621 * 10^{-4}$	-13.3460	25920
02/01/2030 10:08	02/01/2030 14:36	$2.5964 * 10^{-4}$	$-2.3207 * 10^{-4}$	-7.8386	16080

Orbita 28

Periodo da circa 14 giorni.

Nel freq shift si nota simmetria

Pj28 = 29 gennaio 2030, 16:39

17/01/2030 02:52	17/01/2030 22:46	$6.1893 * 10^{-4}$	$-9.6114 * 10^{-4}$	-33.4156	71640
18/01/2030 04:31	18/01/2030 06:04	$2.8753 * 10^{-4}$	/	-12.3073	5580
18/01/2030 11:13	18/01/2030 12:47	/	$-2.8710 * 10^{-4}$	-11.0822	5640
18/01/2030 18:32	19/01/2030 05:51	$9.6866 * 10^{-4}$	$-4.3431 * 10^{-4}$	-25.4495	40740

Orbita 29

Pj29 = 16 febbraio 2030, 12:31

31/01/2030 12:47	01/02/2030 01:23	0.0022	-0.0011	-46.4730	45360
01/02/2030 05:27	01/02/2030 07:31	$3.3312 * 10^{-4}$	/	-13.3986	7440
01/02/2030 12:45	01/02/2030 13:47	/	$-2.4199 * 10^{-4}$	-10.5050	3720
01/02/2030 16:24	01/02/2030 17:28	$2.4326 * 10^{-4}$	/	-10.9568	3840
01/02/2030 22:50	02/02/2030 00:57	/	$-3.0935 * 10^{-4}$	-10.8517	7620
02/02/2030 04:35	02/02/2030 06:47	$3.0005 * 10^{-4}$	/	-11.3107	7920
02/02/2030 09:23	02/02/2030 16:04	$5.7528 * 10^{-4}$	$-6.5851 * 10^{-4}$	-18.2737	24060

Orbita 30

Pj30 = 2 marzo 2030, 19:18

17/02/2030 21:17	18/02/2030 09:55	0.0036	-0.0020	-67.5414	45480
18/02/2030 15:08	18/02/2030 16:25	$2.7071 * 10^{-4}$	/	-12.5951	4680
18/02/2030 21:36	18/02/2030 22:57	/	$-2.6954 * 10^{-4}$	-11.6567	4860
19/02/2030 04:16	19/02/2030 15:54	0.0013	-0.0022	-42.5484	41880

Orbita 31

Le orbite continuano a ruotare, l'argomento al pericentro è maggiore di 90 gradi ormai da qualche orbita e l'occultazione si sta spostando sempre più verso il pericentro a mano a mano che l'orbita ruota e la terra si sposta. Per questa ragione prenderemo un intervallo di tempo più esteso per l'orbita 31, andremo dal 3 marzo al 28 marzo, data approssimativa di occupazione dell'apocentro da parte della sonda. In questo modo d'ora in poi, a partire dall'orbita 32, le orbite saranno definite da apocentro e la zona di occultazione e pericentro saranno più o meno centrate nell'intervallo di tempo considerato.

Pj31 = 20 marzo 2030, 15:02

Si ricorda che questa è in realtà circa un'orbita e mezzo per essere rigorosi.

03/03/2030 23:18	04/03/2030 17:38	0.0018	$-7.9611 * 10^{-4}$	-38.2635	66000
04/03/2030 23:12	04/03/2030 23:45	/	$-2.3089 * 10^{-4}$	-10.9777	2000
05/03/2030 06:08	05/03/2030 17:15	0.0016	$-9.9674 * 10^{-4}$	-39.9492	40000
21/03/2030 09:05	22/03/2030 02:35	$7.1792 * 10^{-4}$	$-5.7992 * 10^{-4}$	-26.8985	63000
22/03/2030 14:32	23/03/2030 01:38	$9.9824 * 10^{-4}$	-0.0022	-38.8169	40000

Orbita 32

Orbita a periodo di 14 giorni e singola occultazione forte vicino al perigio come previsto.

Pj32 = 3 aprile 2030, 21:55

04/04/2030 17:57	06/04/2030 09:14	0.0046	-0.0031	-77.7734	141420
<p>Orbita 33</p> <p>Pj33 = 18 aprile 2030, 02:59</p>					
18/04/2030 19:29	19/04/2030 15:03	$7.7444 * 10^{-4}$	-0.0011	-37.5610	70440
19/04/2030 18:26	20/04/2030 09:47	0.0010	-0.0034	-47.9105	55260
<p>Orbita 34</p> <p>Pj34 = 2 maggio 2030, 08:36</p>					
03/05/2030 02:14	03/05/2030 17:21	$7.5525 * 10^{-4}$	-0.0016	-39.0856	54420
03/05/2030 21:26	04/05/2030 10:01	$5.1018 * 10^{-4}$	$-7.6275 * 10^{-4}$	-15.9659	45300
<p>Orbita 35</p> <p>Pj35 = 14 maggio 2030, 19:24</p>					
15/05/2030 07:41	15/05/2030 08:13	/	$-2.1061 * 10^{-4}$	-6.9724	1920
15/05/2030 11:53	16/05/2030 03:01	$7.2580 * 10^{-4}$	-0.0016	-36.6809	54480
16/05/2030 07:04	16/05/2030 19:18	$4.3739 * 10^{-4}$	$-5.2958 * 10^{-4}$	-13.1914	44040
<p>Orbita 36</p> <p>Flyby di Callisto, occultazione molto debole</p> <p>23 maggio – 4 giugno</p> <p>Pj36 = 27 maggio 2030, 05:43</p>					
27/05/2030 22:06	28/05/2030 05:05	$5.3976 * 10^{-4}$	$-8.2879 * 10^{-4}$	-21.0901	25140
28/05/2030 07:55	28/05/2030 12:06	$2.7376 * 10^{-4}$	$-2.6107 * 10^{-4}$	-7.4909	15060
28/05/2030 19:42	28/05/2030 20:31	$2.2973 * 10^{-4}$	/	-5.6382	2940
<p>Orbita 37</p> <p>L'inclinazione è troppo elevata perché le occultazioni siano incisive, il TEC non è nullo, ma è di quattro ordini di grandezza inferiore rispetto al solito: ciò giustifica l'assenza di frequency shift.</p> <p>Il perigio è drasticamente allontanato da Europa rispetto alle precedenti orbite.</p> <p>Pj37 = 5 giugno 2030, 21:08</p> <p>*In questa orbita, e di qui in avanti, è come se la science phase si interrompesse lasciando che con una serie successiva di orbite la sonda modificasse drasticamente la propria traiettoria capovolgendo perigio ed apogio.</p>					
/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 38</p> <p>Pj38 = 18 giugno, 09:47</p>					

/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 39</p> <p>Pj39 = 30 giugno 2030, 22:18</p>					
/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 40</p> <p>Ancora non ci sono occultazioni, ma un flyby di Callisto modifica l'inclinazione della traiettoria allontanando il perigio di quella che sarà la prossima orbita.</p> <p>Pj40 = 13 luglio 2030, 10:51</p>					
/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 41</p> <p>Il perigio è ancora più lontano da Europa, e Callisto viene nuovamente sfruttato per un flyby.</p> <p>Orbita: 23 luglio – 9 agosto 2030</p> <p>Pj41 = 25 luglio 2030, 13:55</p>					
/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 42</p> <p>L'allontanamento del perigio rivela il suo scopo, apogio e perigio della nuova orbita vengono letteralmente capovolti rispetto a prima e lo spacecraft viene rallentato.</p> <p>Pj42 = 19 agosto 2030, 13:38</p>					
/	/	/	/	/	/
<p>Orbita 43</p> <p>La sonda sfrutta Callisto per rallentare bruscamente e restringere notevolmente il perigio, riportandosi in un tipo di orbita dove si presentano occultazioni. Anche in questo caso la variazione di traiettoria è molto marcata, è difficile parlare di ellisse. Potremmo parlare di un'orbita di assestamento, come tutto l'involuppo di recenti orbite prive di occultazioni. Una dopo l'altra hanno permesso di cambiare completamente la posizione del perigio di circa 180 gradi rispetto a Giove.</p> <p>Pj43 = 5 settembre 2030, 12:29</p>					
04/09/2030 22:42	05/09/2030 02:24	$4.9070 * 10^{-4}$	$-3.1564 * 10^{-4}$	-8.9542	13320
<p>Orbita 44</p> <p>Pj44 = 16 settembre 2030, 15:03</p>					
16/09/2030 02:06	16/09/2030 06:23	$7.0110 * 10^{-4}$	$-6.8522 * 10^{-4}$	-13.9868	15420
<p>Orbita 45</p> <p>Pj45 = 27 settembre 2030, 17:34</p>					

27/09/2030 05:31	27/09/2030 10:20	$6.7146 \cdot 10^{-4}$	-0.0012	-17.8908	17340
<p>Orbita 46</p> <p>Con un gravity assist con Callisto il piano orbitale della sonda Europa Clipper viene portato a coincidere praticamente con quello equatoriale. Orbita: 3 ottobre – 16 ottobre 2030.</p> <p>Pj46 = 8 ottobre 2030, 09:58</p>					
07/10/2030 06:40	07/10/2030 20:30	0.0011	-0.0016	-37.7275	49800
07/10/2030 23:01	08/10/2030 09:38	0.0058	-0.0069	-71.4912	38220
<p>Orbita 47</p> <p>Pj47 = 19 ottobre 2030, 09:46</p>					
18/10/2030 07:09	19/10/2030 09:49	0.0069	-0.0047	-66.1448	96000
<p>Orbita 48</p> <p>Pj48 = 30 ottobre 2030, 15:17</p>					
29/10/2030 13:23	30/10/2030 15:10	0.0025	-0.0033	-43.4402	92820
<p>Orbita 49</p> <p>Sfruttando Callisto si restringe l'orbita per avvicinare il perigio ad Europa.</p> <p>Pj49 = 10 novembre 2030, 20:37</p> <p>Questa è la prima orbita dopo la fase di transizione con perigio sulla traiettoria di Europa (da orbita 29).</p>					
09/11/2030 22:24	10/11/2030 11:43	0.0044	-0.0062	-68.9772	47940
10/11/2030 14:24	10/11/2030 22:23	0.0062	-0.0057	-73.4788	28740
<p>Orbita 50</p> <p>Pj50 = 20 novembre 2030, 14:39</p>					
19/11/2030 15:46	20/11/2030 16:33	0.0026	-0.0016	-35.2822	89220
<p>Orbita 51</p> <p>Pj51 = 30 novembre 2030, 08:37</p>					
29/11/2030 10:33	29/11/2030 18:18	0.0062	-0.0069	-76.0743	27900
30/11/2030 00:03	30/11/2030 10:06	0.0060	-0.0060	-76.3564	36180
<p>Orbita 52</p> <p>8 dicembre – 19 dicembre 2030</p> <p>Pj52 = 10 dicembre 2030, 02:01</p>					

09/12/2030 07:07	09/12/2030 17:07	0.0043	-0.0061	-67.2847	36000
09/12/2030 20:12	10/12/2030 06:09	0.0063	-0.0076	-70.8407	35820
Orbita 53 Pj53 = 21 dicembre 2030, 21:55					
21/12/2030 03:00	22/12/2030 02:21	0.0020	-0.0015	-38.1988	84060
Orbita 54 Pj54 = 2 gennaio 2031, 19:07					
02/02/2031 00:43	02/01/2031 09:49	0.0070	-0.0043	-61.1079	32760
02/01/2031 12:45	02/01/2031 22:43	0.0076	-0.0058	-78.3001	35880
Orbita 55 Pj55 = 14 gennaio 2031, 16:43					
13/01/2031 23:00	14/01/2031 06:19	0.0068	-0.0076	-75.4848	26340
14/01/2031 12:02	14/01/2031 21:28	0.0058	-0.0058	-70.9758	33960
Orbita 56 Una manovra di gravity assist con Europa genera un cambio di inclinazione dell'orbita a valle del perigio. Pj56 = 28 gennaio 2031, 20:25					
28/01/2031 02:40	28/01/2031 11:06	0.0065	-0.0036	-58.1703	30360
28/01/2031 13:52	28/01/2031 23:57	0.0070	-0.0051	-72.2445	36300
Orbita 57 Altro gravity assist con Europa per aumentare l'inclinazione dell'orbita. Pj57 = 12 febbraio 2031, 00:18					
11/02/2031 08:14	12/02/2031 06:34	0.0063	-0.0081	-77.6412	80400
Orbita 58 Pj58 = 26 febbraio 2031, 04:13					
25/02/2031 14:24	26/02/2031 11:13	0.0080	-0.0069	-79.2219	74940
Orbita 59 Pj59 = 12 marzo 2031, 08:44					
11/03/2031 19:40	12/03/2031 15:07	0.0066	-0.0073	-74.1558	70020
Orbita 60					

Pj60 = 26 marzo 2031, 12:24					
26/03/2031 00:47	26/03/2031 21:58	0.0046	-0.0073	-61.2944	76260
<p style="text-align: center;">Orbita 61 Riduzione dell'apertura dell'orbita.</p> <p style="text-align: center;">Pj61 = 9 aprile 2031, 16:24</p>					
09/04/2031 05:59	10/04/2031 02:26	0.0085	-0.0073	-76.9002	73620
<p style="text-align: center;">Orbita 62</p> <p style="text-align: center;">Pj62 = 22 aprile 2031, 00:10</p>					
21/04/2031 14:18	21/04/2031 23:42	0.0079	-0.0078	-73.8011	33840
22/04/2031 02:28	22/04/2031 11:43	0.0068	-0.0067	-73.0492	33300
<p style="text-align: center;">Orbita 63 Gravity assist con Europa.</p> <p style="text-align: center;">Pj63 = 4 maggio 2031, 09:25</p>					
03/05/2031 23:57	04/05/2031 21:40	0.0078	-0.0078	-74.0682	78180
<p style="text-align: center;">Orbita 64</p> <p style="text-align: center;">Pj64 = 16 maggio 2031, 19:54</p>					
16/05/2031 10:14	17/05/2031 07:51	0.0081	-0.0061	-67.3389	77820
<p style="text-align: center;">Orbita 65</p> <p style="text-align: center;">Pj65 = 29 maggio 2031, 04:34</p>					
28/05/2031 20:25	29/05/2031 17:46	0.0070	-0.0060	-62.3652	76860
<p style="text-align: center;">Orbita 66 Gravity assist su Europa restringe l'orbita aumentandone l'inclinazione.</p> <p style="text-align: center;">Pj66 = 12 giugno 2031, 09:04</p>					
12/06/2031 00:50	12/06/2031 22:26	0.0083	-0.0065	-79.3144	77760
<p style="text-align: center;">Orbita 67</p> <p style="text-align: center;">Pj67 = 24 giugno 2031, 18:51</p>					
24/06/2031 10:21	25/06/2031 07:59	0.0084	-0.0066	-79.8541	77880
<p style="text-align: center;">Orbita 68</p>					

<p>Anche in questa orbita, come nella ventina di precedenti l'avvicinamento ad Europa produce delle piccole variazioni nel periodo e nell'inclinazione dell'ellisse orbitale.</p> <p>Pj68 = 7 luglio 2031, 04:39</p>					
06/07/2031 22:55	07/07/2031 18:27	0.0051	-0.0051	-62.8108	70320
<p>Orbita 69</p> <p>Leggero restringimento orbitale.</p> <p>Pj69 = 21 luglio 2031, 08:21</p>					
21/07/2031 02:02	21/07/2031 21:41	0.0071	-0.0078	-78.9217	70740
<p>Orbita 70</p> <p>Pj70 = 2 agosto 2031, 18:28</p>					
02/08/2031 12:03	03/08/2031 07:42	0.0068	-0.0078	-79.7193	70740
<p>Orbita 71</p> <p>Pj71 = 15 agosto 2031, 04:51</p>					
14/08/2031 22:09	15/08/2031 19:48	0.0068	-0.0077	-78.3222	77940
<p>Orbita 72</p> <p>Pj72 = 29 agosto 2031, 08:45</p>					
29/08/2031 02:31	30/08/2031 00:56	0.0064	-0.0078	-73.5566	80700
<p>Orbita 73</p> <p>Pj73 = 10 settembre 2031, 19:13</p>					
10/09/2031 13:47	11/09/2031 12:18	0.0073	-0.0063	-75.6375	81060
<p>Orbita 74</p> <p>Pj74 = 23 settembre 2031, 04:12</p>					
22/09/2031 23:02	23/09/2031 21:45	0.0041	-0.0031	-54.1652	81780
<p>Orbita 75</p> <p>Qui vi è l'ultimo perigio della missione, l'orbita non arriva a chiudersi a causa della terminazione di dati contenuti nel kernel utilizzato.</p> <p>Pj75 = 7 ottobre 2031, 08:39</p>					
07/10/2031 04:55	08/10/2031 03:20	0.0074	-0.0077	-78.9433	80700

Conclusione

L'elaborato si pone in conclusione come una analisi meramente predittiva del fenomeno dell'occultazione. Disponendo di un campo scalare di densità elettronica locale nello spazio l'obiettivo di prevedere l'andamento del frequency shift è quello di fornire risultati utilizzabili per correggere sfasamenti frequenziali sulle portanti di trasmissione salvaguardandone il contenuto. Non si è partiti cercando risposte, ma dati, e a questo si è arrivati.

I dati ottenuti su Juno non rivelano alcunché di anomalo dal perigio 22 fino alla fine della missione, le finestre di occultazione sono ampiamente distanziate nel tempo (circa 52 giorni) e si presentano uniformemente al perigio di ogni orbita, come facilmente prevedibile vista la geometria del problema; un tipo di ellisse così ampia e quasi-polare, con pericentro entro l'orbita di Io e rivolto verso la Terra rispetto a Giove non avrebbe potuto non avere occultazioni con questa cadenza.

Non è tuttavia così che il legame tra Juno e le occultazioni prodotte dal toro di plasma di Io si conclude. La cosa interessante è che la missione Juno, grazie alla sua doppia banda di trasmissione, può in realtà isolare il frequency shift, e utilizzarlo per risalire ad una sempre più precisa ricostruzione della funzione di densità elettronica. Questo aspetto, non affrontato nella tesi, può essere utilizzato per confermare la bontà del modello predittivo creato. Tra i dati che la sonda Juno invia alla Terra in prossimità dei perigio vi è anche il reale andamento del frequency shift contenuto dal segnale; confrontando il profilo reale con quello supposto si possono perfezionare gli attuali modelli di toro utilizzati, rendendoli più precisi, e sensibili alle asimmetrie e ai fenomeni tempo-varianti.

Europa Clipper invece è una missione che non è stata programmata per ottenere questo tipo di informazione, e per la quale dunque un'analisi del genere può avere il solo scopo di salvaguardare i risultati delle investigazioni di gravity science della sonda. Anche in questo caso le occultazioni si presentano in tempi e luoghi prevedibili conoscendo le posizioni reciproche tra sistema gioviano e Terra. Se nella prima parte di science phase l'intensità del frequency shift può raggiungere al massimo picchi simili a quanto visto per Juno, è la seconda parte, successiva a quella di transizione detta di capovolgimento, che presenta valori molto alti di interferenza. Il contenuto di elettroni sulla linea di vista raggiunge vette alte quasi il doppio rispetto a quanto visto per Juno, e lo stesso vale per gli sfasamenti in frequenza. Un maggiore ruolo della magnetosfera gioviana nella missione Europa Clipper rispetto che in Juno, al di là dello specifico campo delle comunicazioni con la Terra, poteva comunque essere previsto essendo la traiettoria della sonda quasi equatoriale per tutta la science phase, e non polare; come si sono presi provvedimenti nella progettazione dell'orbiter così se ne dovranno prendere per fare i conti con le occultazioni del segnale.

È doveroso ricordare che il numero elevatissimo di semplificazioni e fenomeni trascurati in questa tesi rendono le sue conclusioni più un utile esercizio che non un reale banco di dati pronti a descrivere un fenomeno reale, un punto di partenza a cui apportare migliorie che lo rendano uno strumento più "competitivo". Considerare il link di trasmissione completo anziché one-way, non trascurare il tempo luce, ridurre il costo computazionale delle operazioni possono essere le modifiche più immediate. Considerare l'ingombro fisico delle lune gioviane e le possibili occultazioni dovute al loro passaggio, il contenuto di plasma delle ionosfere di Giove e della Terra, la reale geometria della traiettoria del segnale e una più attendibile modellazione del toro diventano già cambiamenti più radicali ma necessari per un'analisi completa delle opportunità di occultazione di una missione interplanetaria.

Bibliografia

- Bagenal, F. et al. *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*. 2004
- Bagenal, F. & James D. Sullivan. *Direct Plasma Measurements in the Io Torus and Inner Magnetosphere of Jupiter*. Journal of Geophysical Research, VOL 86, 1981.
- Bagenal, F. & R. J. Wilson. *Jupiter Coordinate Systems*. LAPS – University of Colorado, maggio 2016.
- Bolton, S. J. et al. *The Juno Mission*. Springer Science+Buisness Media B.V., 2017.
- Bolton, S. J. and the Juno Science Team. *The Juno Mission*. International Astronomical Union, 2010.
- Gomez Casajus, Luis. *Development of methods for the global ephemeris estimation of the gas giant satellite systems*. 2019.
- Khurana, Krishan K. et al. *The configuration of Jupiter's Magnetosphere*. Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, 2004.
- Martin, Paul K. et al. *Management of NASA's Europa Mission*. NASA OIG, Report No. IG-19-019, 2019.
- Mengali, G. & A. Quarta. *Fondamenti di Meccanica del Volo Spaziale*. Pisa University Press, 2013.
- Pappalardo, R. et al. *The Europa Clipper OPAG Update*. Pre-decisional document by JPL & APL, 2013.
- Peale, S. J., et al. *Melting of Io by Tidal Dissipation*. Science, Vol. 203, 1979.
- Phipps, Philipp H. & Paul Withers. *Radio occultations of the Io plasma torus by Juno are feasible*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017.

- Phipps, Philipp H. & Paul Withers, et al. *Variations in the Density Distribution of the Io Plasma Torus as Seen by Radio Occultations on Juno Perijoves 3,6 and 8*. Journal of Geophysics: Space Physics, 2019.
- Senske, D.; L. Prockter; et al. *Science that can be achieved from the Europa Clipper mission concept: a means to explore Europa and investigate its habitability*. Lunar and Planetary Science Conference, 2013.
- Verma, Ashok K. & Jean-Luc Margot. *Expected precision of Europa Clipper gravity measurements*. Icarus 314, 2018.
- Yoder, C.F., et al. *How tidal heating in Io drives the Galilean orbital resonance locks*. Nature 279, 1979.

Sitografia

- Jet Propulsion Laboratory (JPL). *NASA's Europa Clipper*. NASA, 2019.
<<https://europa.nasa.gov/>>
- NAIF 2019. *SPICE Required Reading Documents*. NASA, 2019.
<https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/C/req/index.html>
- NASA SCIENCE. *Mission Models*. NASA, 2019.
<<https://science.nasa.gov/about-us/science-strategy/mission-models-strategic-and-pi-led>>
- Tony Greicius. *Juno – Mission to Jupiter*. NASA, 2018.
<https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html>
- PSC at NASA's JPL. *Jupiter-in depth*. NASA's Science Mission Directorate, 2019.
<<https://solarsystem.nasa.gov/planets/jupiter/in-depth/>>