

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Dipartimento di Ingegneria Industriale
Sede di Forlì
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale
Classe L-9

Missione JUICE: analisi delle opportunità per esperimenti di radar bistatico su Ganimede

Elaborato finale di laurea in
ING-IND/05: Fondamenti di Meccanica Orbitale

Candidata:
Giulia Amatori

Relatore:
Prof. Paolo Tortora
Correlatore:
Dott. Giancorrado Brighi

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Esperimenti di radar bistatico sono stati impiegati con successo nell'esplorazione spaziale ai fini di sondare a distanza superfici planetarie attraverso la riflessione di un segnale radio da parte di un corpo bersaglio. Una appropriata analisi degli echi riflessi può fornire informazioni sulla struttura, sulla composizione chimica e sulla rugosità della superficie del target su scale proporzionali alle lunghezze d'onda trasmesse.

Nel seguente studio si propone la modellazione della geometria del collegamento radio tra JUICE e la Terra per trovare opportunità per la sonda di eseguire esperimenti di radar bistatico sulla superficie di Ganimede, durante i soli flyby della luna. Questi, anche se ancora non programmato con dettaglio nella fase scientifica della missione, potrebbero coincidere con finestre temporali plausibili per l'implementazione degli esperimenti analizzati. Vengono riportate ulteriori considerazioni sull'angolo di incidenza e sull'effetto che questo avrà sull'accuratezza della stima della costante dielettrica superficiale della luna, effettuabile con osservazioni bistatiche.

L'algoritmo principale per il calcolo del punto speculare e i grafici presentati, sono stati implementati con l'ausilio del software MATLAB e del toolkit SPICE.

I risultati ottenuti analizzando i flyby presi a riferimento mostrano come la geometria della missione, per la maggior parte di essi, non sia la più favorevole per poter effettuare questo tipo di osservazione. Solo tre dei sette flyby analizzati, G04, G05 e G06, risultano avere una geometria favorevole per esperimenti di radar bistatico su Ganimede.

Key words:

JUICE Radar bistatico Ganimede Brewster angle Costante dielettrica

Indice

1	Introduzione	1
2	Il Sistema di Giove	3
2.1	Il gigante Gassoso	4
2.2	Le lune galileiane	5
2.3	Ganimede	7
2.3.1	Atmosfera	9
2.3.2	Forma e struttura interna	9
3	La missione JUICE	11
3.1	Overview della missione	11
3.2	Obiettivi scientifici	12
3.3	Design della missione	14
3.3.1	Fase scientifica	16
3.3.2	Fase orbitale di Ganimede	18
3.4	Spacecraft	19
3.4.1	Esperimento di radioscienza	21
4	Radar bistatico	22
4.1	Geometria dell'esperimento BSR	22
4.2	Polarizzazione e costante dielettrica	24
4.3	Angolo di Brewster	26
5	Analisi delle opportunità per esperimenti di BSR su Ganimede	27
5.1	SPICE e i suoi kernels	28
5.2	Geometria e Timeline	29
5.3	Algoritmo per il calcolo del punto speculare	30
5.3.1	Check geometrico	33
6	Risultati ottenuti	34
6.1	Flyby G01, G02 e G03	35

6.2	Flyby G04, G05 e G07	37
6.3	Flyby G06	40
7	Conclusioni	41

Elenco delle figure

2.1	Immagine di Giove ed Europa (sulla sinistra), catturata dal telescopio spaziale Hubble il 25 agosto 2020. Crediti: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), and M. H. Wong (University of California, Berkeley) and the OPAL team.	4
2.2	I quattro satelliti galileiani di Giove. Da sinistra a destra: Io, Europa, Ganimede e Callisto. Crediti: NASA/JPL/DLR [22]	6
2.3	Flyby di Callisto nell'aprile del 2031. Crediti: ESA, JUICE's Jovian odyssey.	7
2.4	Immagine di Ganimede scattata dalla sonda Juno della NASA. Image Credit: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS	8
3.1	JUICE è dotato di numerosi strumenti scientifici altamente tecnologici, oltre che di grandi pannelli solari che lo riforniscono di energia. Crediti: ESA/ATG medialab	12
3.2	Traiettoria di JUICE rispetto a Giove e alle sue tre lune ghiacciate in un intervallo compreso tra il 10 aprile 2032 e il 16 marzo 2033. In figura si notano diverse intersezioni tra le orbite di JUICE e delle lune, spesso concomitanti con flyby. L'asse x e l'asse y sono normalizzati per il raggio di Giove.	14
3.3	Andamento della distanza tra JUICE e la superficie di Ganimede tra il 10 febbraio 2032 e il 26 gennaio 2035	16
3.4	La linea rossa rappresenta un'altitudine pari a 15000 km, sotto alla quale si hanno dei flyby. Si noti dopo il dicembre 2034 come l'altitudine rispetto a Ganimede si faccia oscillante e sempre inferiore ai 10000 km per via dell'ingresso in orbita intorno alla luna.	17
3.5	Traiettoria di JUICE con marker su posizioni della sonda e di Ganimede con Giove 3D al centro, in una data coincidente col flyby. Quindi si è preso l'intorno di un punto di tangenza e si è fatto vedere che per una data specifica, le posizioni delle lune e di JUICE sono molto vicine.	17

3.6	Traiettoria di JUICE rispetto a Ganimede dal 20 dicembre 2034 al 05 ottobre 2035. Si possono distinguere visivamente alcuni gruppi di orbite con caratteristiche simili: un gruppo di orbite più larghe, poi ve ne sono altre di restringimento e infine abbiamo la fase di orbita circolare a bassa quota attorno a Ganimede.	18
3.7	La sonda JUICE è dotata di numerosi strumenti scientifici altamente tecnologici, oltre che di grandi pannelli solari per l'alimentazione. Crediti: ESA/ATG medialab	20
3.8	Esempio di utilizzo di 3GM. I segnali radio in banda X (linee blu) e banda Ka (linee rosse) vengono trasmessi dalla stazione di Terra al veicolo spaziale e coerentemente ritrasmessi sulla Terra mediante transponder a bordo del veicolo spaziale. [1]	21
4.1	Geometria di un esperimento di radar bistatico con configurazione downlink. [26]	23
4.2	Esempio della geometria di un'osservazione bistatica in downlink con trasmissione polarizzata circolarmente in senso antiorario (right-sense). Attraverso il processo di riflessione della superficie, viene generata una componente polarizzata circolarmente in senso orario (left-sense). A Terra le due componenti polarizzate ortogonalmente vengono ricevute in modo separato. [9]	24
5.1	Esempio di check geometrico ottenuto confrontando il raggio riflesso con la congiungente punto speculare-Terra nel corso del flyby G02, nomenclatura di riferimento tab. 5.1	33
6.1	Grafico del rapporto di potenza al variare dell'angolo di incidenza. In verde è rappresentato l'angolo di Brewster per $\epsilon = 3.1$, mentre gli estremi del range di validità degli angoli di incidenza è evidenziato con linee tratteggiate di colore blu.	35
6.2	Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno dei flyby G01, G02 e G03.	36
6.3	Grafici riferiti ai primi tre flyby di JUICE su Ganimede. Ragionando per colonne, la prima rappresenta gli angoli di incidenza relativi ai rispettivi flyby, mentre la seconda riporta l'altitudine tra la sonda e Ganimede. Sono evidenziati i closest approach (cerchio azzurro).	36
6.4	Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno dei flyby G04,G05 e G07	37
6.5	Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G04.	39

6.6	Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G05.	39
6.7	Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G07.	39
6.8	Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno del flyby G06.	40
6.9	Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G06.	40

Elenco delle tabelle

2.1	Tabella di alcune delle caratteristiche fisiche di Giove	5
2.2	Tabella con alcune delle caratteristiche fisiche di Ganimede	9
3.1	Riassunto degli obiettivi scientifici della missione JUICE	13
3.2	Timeline della missione JUICE. Crediti: European Space Agency (ESA),2022	15
5.1	Timeline dei sette flyby di Ganimede. È stata riportata la data di inizio, di fine e quella corrispondente al closest approach (avvicinamento massimo).	30
6.1	Tabella riassuntiva dei flyby con occultazione. Viene riportato l'ID del flyby con rispettivo intervallo di tempo dell'occultazione. Si nota come, rispetto alla durata totale del flyby, le occultazione sono presenti solo per un breve periodo.	38

Capitolo 1

Introduzione

La missione JUICE (JUperiter ICy moon Explorer), selezionata dall'ESA nel maggio 2012 per essere la prima grande missione del Cosmic Vision Program 2015-2025, fornirà la più completa esplorazione fino ad oggi del sistema gioviano in tutta la sua complessità, con particolare attenzione su Ganimede, come corpo planetario e potenziale habitat. [1]

Il radar bistatico, implementato in passato da altre sonde oltre a JUICE, è uno dei diversi strumenti utilizzati in esperimenti di radio scienza per sondare a distanza superfici planetarie.

Quando un segnale radio viene inviato ad un corpo bersaglio e riflesso dalla sua superficie, le caratteristiche del terreno a scale proporzionali alle lunghezze d'onda del radar, interagiscono con esso. Una corretta elaborazione degli echi riflessi può offrire informazioni utili sulla composizione chimica della superficie del corpo osservato, e permette di ottenere stime della rugosità e della densità superficiale. [26]

La sonda JUICE è equipaggiata con l'esperimento 3GM (Gravity and Geophysics of Jupiter and the Galilean Moons), che, attraverso un ultra stable oscillator (USO), sfrutterà radio links in banda X e Ka per effettuare tutti gli esperimenti di radio scienza previsti dalla missione. Anche se ancora non pianificato con dettaglio nella sua fase scientifica, JUICE potrebbe effettuare osservazioni bistatiche di Ganimede in due occasioni: i flyby della luna che precedono la fase finale di orbita intorno a Ganimede, e questa fase finale di osservazione ravvicinata del satellite galileiano. [1]

L'obiettivo della tesi è quello di modellare la geometria del collegamento radio da JUICE alla Terra e trovare opportunità per la sonda di eseguire esperimenti di radar bistatico sulla superficie di Ganimede durante i soli flyby della luna.

Il calcolo dell'evoluzione temporale della posizione dell'orbiter JUICE e di altri oggetti planetari utili rispetto ad un riferimento scelto è stato svolto con SPI-

CE, software distribuito dal team Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) del Jet Propulsion Laboratory, a partire da banche dati rese disponibili online da NASA ed ESA (kernels).

Alla determinazione della fattibilità geometrica delle osservazioni bistatiche durante i sorvoli della luna di Giove, si sono aggiunte considerazioni sull'effetto che l'angolo di incidenza ha sull'accuratezza delle possibili stime di costante dielettrica superficiale.

Lo studio parte dalla premessa che la superficie di Ganimede sia in massima parte ricoperta da ghiaccio d'acqua, e trascura il puntamento delle antenne della sonda presente ad oggi nei kernel di missione.

La documentazione relativamente ampia sui precedenti esperimenti di radar bistatico eseguiti su altri pianeti e lune del sistema solare, ha fornito una preziosa fonte di informazioni su come affrontare questa indagine scientifica, aiutando ad individuare criteri validi per valutare le qualità delle diverse opportunità di osservazione.

Il seguente elaborato è strutturato in diversi capitoli contenenti le informazioni necessarie per comprendere il come e il perchè del lavoro svolto.

Nel capitolo 2 vi è la descrizione dell'ambiente gioviano, con particolare riferimento alle lune galileiane e un'analisi più approfondita su Ganimede, l'obiettivo principale dell'elaborato. Nel capitolo 3 si è andati a descrivere la missione partendo da un quadro generale, fino ad analizzare più nello specifico traiettorie e payload, fondamentali per la comprensione dell'analisi. La descrizione degli algoritmi di risoluzione, come lo script principale in grado di individuare il punto speculare tra Terra, JUICE e Ganimede (pensato come un ellissoide) e i risultati fondamentali delle analisi, sono riportati rispettivamente nel capitolo 5 e 6, in seguito alla presentazione, nel capitolo 4, del radar bistatico e della sua geometria.

Capitolo 2

Il Sistema di Giove

Il sistema gioviano può essere considerato come un sistema solare in miniatura a sé stante. Comprende una moltitudine di entità, che possono essere suddivise in più sottosistemi [14] :

- Il pianeta Giove con la sua vasta gamma di fenomeni atmosferici e la sua interazione con l'ambiente planetario circostante.
- Un ricco sistema di satelliti che comprende le quattro lune galileiane Io, Europa, Ganimede e Callisto (oggetti di classe 1000 km, tre dei quali possiedono con buona probabilità oceani sotterranei), i quattro satelliti interni Metis, Adrastea, Amalthea e Thebe (classe 10-100 km), 55 piccoli satelliti irregolari esterni (oggetti di classe da 1 a 100 km) e per estensione anche il sistema di anelli gioviani.
- Le tenui atmosfere dei satelliti galileiani, i loro processi produttivi e le loro interazioni con l'ambiente locale circostante.
- La gigantesca magnetosfera di Giove, la più grande del Sistema Solare, contenente tutti i corpi citati fino ad ora, e in forte interazione con due di loro [14]; in particolare Io, la cui atmosfera è costituita da una nuvola di materiale neutro di intensa radiazione, denominata **toro di plasma**, che viene ininterrottamente rigenerata dalla continua attività vulcanica della luna e in grado di fornire un flusso continuo di materia prima che può ionizzarsi a causa della magnetosfera di Giove [24], e Ganimede con la sua mini-magnetosfera interna a quella del pianeta. [14]

Per poter avere una panoramica dell'ambiente in cui si troverà a lavorare la sonda JUICE, una descrizione di Giove e dei suoi satelliti galileiani è riportata di seguito, insieme ad alcuni dati utili nelle analisi dei prossimi capitoli.

2.1 Il gigante Gassoso

Giove (Fig. 2.1) è il quinto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole e il più grande di tutto il sistema planetario. [8]

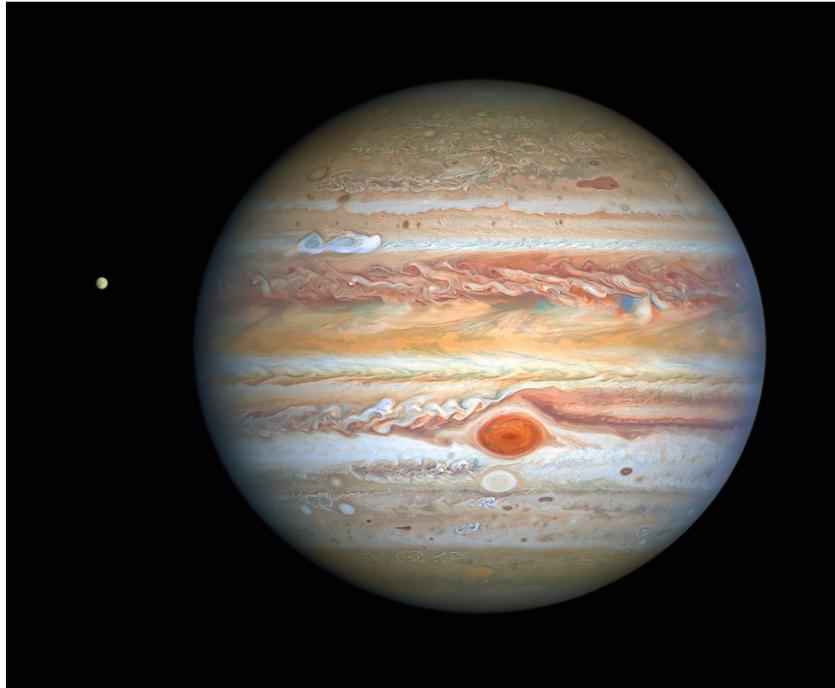


Figura 2.1: Immagine di Giove ed Europa (sulla sinistra), catturata dal telescopio spaziale Hubble il 25 agosto 2020. Crediti: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), and M. H. Wong (University of California, Berkeley) and the OPAL team.

Esso viene classificato come gigante gassoso, in quanto oltre ad un nucleo solido, presumibilmente di natura rocciosa e costituito da carbonio e silicati di ferro, la sua parte esterna è composta soprattutto da elio ed idrogeno con piccole quantità di altri gas composti, quali ammoniaca, metano e vapore acqueo. [19]

Sebbene la sottile atmosfera visibile ("strato meteorologico"), l'unica regione accessibile all'indagine diretta mediante telerilevamento, sia solo una minuscola frazione della massa totale di Giove, fornisce informazioni essenziali sulla struttura interna, sulla composizione della massa e sulla storia della formazione del nostro Sistema Solare che sono alcuni tra gli obiettivi principali della missione.[14]

Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche della luna, esse sono riportate nella tabella (2.1).

L'atmosfera esterna è caratterizzata da numerose bande e zone di tonalità variabili dal color crema al marrone, costellate da formazioni cicloniche e anticicloniche, tra le quali spicca la Grande Macchia Rossa.

DATI FISICI	
Oggetto	Valori
Massa [kg]	$1,8986 \cdot 10^{27}$
Raggio polare [km]	$6,6854 \cdot 10^4$
Raggio equatoriale [km]	$7,1492 \cdot 10^4$
Raggio medio [km]	$6,9173 \cdot 10^4$
Densità media [kg/m^3]	$1,3260 \cdot 10^3$
$\mu = G \cdot M_j$ [km^3/s^2]	$1,2659 \cdot 10^8$
Veocità angolare [rad/s]	$1,7628 \cdot 10^{-4}$
Distanza media tra la la Terra e Giove [km]	$7,8700 \cdot 10^8$

Tabella 2.1: Tabella di alcune delle caratteristiche fisiche di Giove

La rapida rotazione del pianeta gli conferisce l'aspetto di uno sferoide schiacciato ai poli e genera un intenso campo magnetico che dà origine ad un'estesa magnetosfera. [15]

L'enorme campo magnetico di Giove è da 16 a 54 volte più potente di quello della Terra, e il suo asse è inclinato di circa 10° rispetto all'asse di rotazione di Giove stesso. Esso ruota con il pianeta, raccogliendo e accelerando particelle che hanno una carica elettrica. Questo crea intense radiazioni che bombardano le lune più interne e possono danneggiare i veicoli spaziali. Il fenomeno descritto è uno dei motivi per cui, in fase di progetto della missione, si deve tener conto anche dei requisiti necessari alla salvaguardia della sonda stessa. [10]

Una caratteristica molto importante di Giove è la grande quantità di satelliti naturali orbitanti attorno ad esso. Tra questi, quelli di maggior interesse scientifico si trovano al di fuori dell'orbita di Tebe ovvero i quattro satelliti galileiani: Io, Europa, Ganimede e Callisto. [11]

2.2 Le lune galileiane

I quattro satelliti galileiani (Fig. 2.2) sono molto diversi per composizione chimica, superficie, struttura interna, evoluzione e grado di interazione con Giove.

La quarta e più interna luna galileiana, Io, è il corpo vulcanicamente più attivo nel Sistema Solare, con oltre quattrocento vulcani attivi sparsi sulla sua superficie che rilasciano gas, polvere e materiale ionizzato nella sua stessa atmosfera. Questo materiale viene poi spazzato via dall'influenza magnetica di Giove e diffuso in tutto il sistema gioviano. [4]

La missione JUICE, pur non avendolo come obiettivo primario, cercherà di raccogliere informazioni sulla sua composizione superficiale, e su come il satellite naturale aiuti a modellare l'ambiente plasmatico di Giove, caratterizzando come e perché la luna sia così attiva dal punto di vista vulcanico e delle maree.



Figura 2.2: I quattro satelliti galileiani di Giove. Da sinistra a destra: Io, Europa, Ganimede e Callisto. Crediti: NASA/JPL/DLR [22]

Indagando gli altri tre satelliti Ganimede, Europa e Callisto come trio, JUICE dipingerà un quadro comparativo degli ambienti di ciascuno e farà luce sulle loro proprietà e sulla potenziale abitabilità. [4]

Su Europa ci sono diverse misurazioni a favore della presenza di un oceano liquido sotto superficiale. La stessa possibilità, seppur supportata da meno prove, è valida anche per Callisto e Ganimede. [21]

Durante la missione ci saranno numerosi flyby di Callisto (Fig. 2.3) che permetteranno di esplorare sia lo strato esterno che l’oceano fino a una profondità di pochi chilometri per comprendere la struttura interna e il campo gravitazionale della luna, cercare di determinare i processi morfologici nel corso del tempo, oltre a caratterizzare la composizione del materiale non ghiacciato [11].

Callisto è il satellite naturale più fortemente craterizzato del sistema solare. I crateri da impatto e gli anelli ad essi concentrici rappresentano le uniche strutture presenti sulla sua superficie; non vi sono infatti grandi montagne o altre caratteristiche prominenti [6]. Precedenti osservazioni della missione Galileo della NASA suggeriscono che la luna abbia una struttura interna a strati; tuttavia, la sua superficie è molto antica e non sembra essersi evoluta molto nel tempo. Questo particolare è in grado di rivelare informazioni uniche su come si è formata inizialmente e sull’origine del più ampio sistema di Giove. [4]

JUICE eseguirà anche due passaggi ravvicinati con Europa nel luglio 2032, durante i quali effettuerà rilevamenti radar sotto la superficie. Quest’ultima è per lo più acqua ghiacciata e ci sono prove a favore dell’esistenza di un oceano d’acqua o ghiaccio fangoso negli strati più interni. Si pensa che Europa abbia il doppio di acqua rispetto alla Terra [4] e quindi JUICE cercherà di ottenere le informazioni per capire se ci sia o meno la possibilità di sostenere la vita. [14]

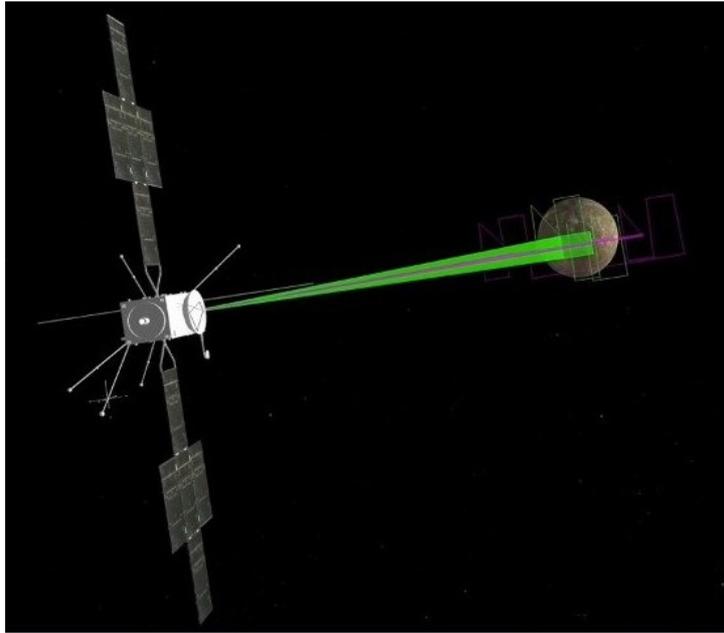


Figura 2.3: Flyby di Callisto nell'aprile del 2031. Crediti: ESA, JUICE's Jovian odyssey.

Infine, la sonda entrerà in orbita attorno a Ganimede, così da poterne caratterizzare gli strati oceanici e occuparsi del rilevamento dei bacini d'acqua sotterranei. Tra gli obiettivi, JUICE tenterà di mappare in maniera dettagliata la superficie, studiare le proprietà fisiche delle croste ghiacciate, determinare la composizione globale, la distribuzione e l'evoluzione nel tempo dei materiali superficiali e inoltre studierà il campo magnetico di Ganimede e Giove, esaminando come questi interagiscono tra loro. [1] Questa lunga fase finale fa capire l'importanza dello studio di Ganimede all'interno della missione ed è per questo che è utile farne un'analisi più dettagliata, riportata qui di seguito.

2.3 Ganimede

Ganimede (Fig. 2.4), con un raggio medio di 2634.1 km, è il più grande satellite del Sistema Solare e occupa un posto molto importante in termini di interesse scientifico, specialmente in geologia.

Alcune aree sulla sua superficie, identificate come terreni scanalati luminosi, attestano l'esistenza di passate attività endogene come la tettonica a placche e il vulcanismo criogenico. [20]

Nella tabella 2.2 sono riportate le caratteristiche fisiche principali della luna.

Tra le peculiarità che hanno portato allo sviluppo della stessa missione JUICE si elencano le seguenti:

- Ganimede è l'unica luna nota per avere un proprio campo magnetico generato internamente. La magnetosfera in miniatura di Ganimede si trova all'interno della grande magnetosfera di Giove, con complesse interazioni che avvengono tra le due e che saranno oggetto di studio della missione. Essa si occuperà di esaminare come le particelle nell'ambiente spaziale vicino a Ganimede influenzano la composizione della superficie lunare, come si sviluppano le aurore sul satellite e come il campo magnetico di Ganimede influenza le aurore su Giove. [17]
- Si presume che abbia un oceano sotto la superficie.
- La superficie di Ganimede si può dividere in due macrocategorie: le regioni scure, antiche e fortemente craterizzate e quelle più chiare, ricche di scoscendimenti e scarpate (Vedi Fig. 2.4). [23]
- Il telescopio spaziale Hubble sembra confermare la presenza di una piccola atmosfera contenente ossigeno. [25]



Figura 2.4: Immagine di Ganimede scattata dalla sonda Juno della NASA. Image Credit: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS

DATI FISICI	
Oggetto	Valori
Raggio medio [km]	$2,6341 \cdot 10^3$
Superficie [km^2]	$8,7 \cdot 10^7$
Massa [kg]	$1,4819 \cdot 10^{23}$
Densità media [km/m^3]	$1,942 \cdot 10^3$
Periodo di rotazione (sincrona) [giorni]	7,16
Temperatura superficiale media [K]	109
Accelerazione di gravità in superficie [m/s^2]	1,43

Tabella 2.2: Tabella con alcune delle caratteristiche fisiche di Ganimede

2.3.1 Atmosfera

L'atmosfera di Ganimede è composta principalmente da ossigeno, seguito da ozono, sodio e idrogeno atomico [17]. La presenza di ossigeno non è una prova dell'esistenza di vita su Ganimede; si pensa infatti che esso sia stato originato dalla scissione in idrogeno e ossigeno di molecole di ghiaccio d'acqua presenti sulla superficie del satellite per effetto della radiazione solare incidente. Mentre l'idrogeno viene rapidamente disperso a causa del suo basso peso atomico, l'ossigeno così liberato va a costituire l'atmosfera del satellite.

Le emissioni luminose osservate su Ganimede non sono spazialmente omogenee come lo sono quelle su Europa. Il Telescopio spaziale Hubble ha osservato due chiazze luminose localizzate nell'emisfero sud e nell'emisfero nord, vicino ai $\pm 50^\circ$ di latitudine, corrispondenti al confine tra le linee di campo aperte e chiuse del campo magnetico di Ganimede. Queste emissioni potrebbero essere aurore polari, causate dalla precipitazione del plasma lungo le linee di campo aperte. [13]

Per quanto riguarda le condizioni termiche, l'atmosfera di Ganimede è molto più fredda rispetto a quella terrestre, con temperature superficiali diurne che vanno da -297 a -171 gradi Fahrenheit. [11]

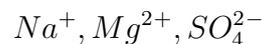
2.3.2 Forma e struttura interna

Ganimede ha una forma ellissoidale pronunciata con semiassi equatoriale e polare che differiscono di 2,4 km, confermando un appiattimento polare della luna. [30] Per semplicità, nello studio dell'esperimento di radar bistatico riportato nel seguente elaborato, si è utilizzata una sfera di raggio medio di 2631,2 km come modello geometrico della luna. Questa è anche la geometria fornita all'interno del

kernel pck¹ caricato per Ganimede.

Per quanto concerne la struttura interna, l'analisi della densità globale di Ganimede con le armoniche sferiche del suo campo gravitazionale mostra senza dubbio che esso è un corpo differenziato composto da tre strati: un nucleo di ferro metallico liquido o parzialmente liquido al centro, circondato da un mantello di silicati ricoperto da un guscio di ghiaccio spesso circa 800 km.

Sulla base di un modello di riscaldamento delle maree derivato dai dati del magnetometro di Galileo, si prevede uno strato d'acqua spesso circa 200 km, parzialmente o interamente liquido, inserito tra due strati di ghiaccio, a una profondità di circa 150 km. Si presume che lo strato liquido di Ganimede sia arricchito da ioni come



a causa dell'alterazione acquosa delle condriti carboniose che si ritiene rappresentino il materiale sfuso che si è accumulato per formare le lune galileiane.

Poiché queste ipotesi non possono essere verificate mediante indagini in situ, l'analisi della composizione della superficie mediante spettroscopia di telerilevamento è il metodo preferibile per determinare le proprietà fisiche e chimiche di questo oceano sotterraneo, con implicazioni per la sua abitabilità. [20]

¹I Planetary Constants Kernel (PCK) forniscono dati sulle costanti cartografiche e fisiche per i corpi del Sistema Solare. Il software SPICE utilizza questi dati per determinare la geometria di osservazione in base alle dimensioni, alla forma e all'orientamento di pianeti, satelliti naturali, comete e asteroidi.[16]

Capitolo 3

La missione JUICE

Quattro secoli fa, la scoperta di Galileo Galilei di quattro grandi lune orbitanti intorno a Giove ha incentivato la Rivoluzione Copernicana e ha cambiato per sempre la nostra visione del Sistema Solare e dell'universo.

Oggi, Giove, con la sua variegata collezione di lune, è visto come l'archetipo per sistemi di pianeti giganti, sia nel nostro Sistema Solare che intorno ad altre stelle in tutta la nostra galassia. Una caratterizzazione completa del sistema gioviano, dal gigante gassoso in movimento con la sua enorme magnetosfera, ai mondi di roccia/ghiaccio orbitanti attorno ad esso, potrebbe aiutarci a comprendere le origini di altri pianeti giganti e dei loro satelliti e a trovare tracce di ambienti potenzialmente abitabili nel freddo Sistema Solare esterno.

Dedicando una missione all'esplorazione del sistema gioviano, con particolare attenzione a Ganimede come habitat planetario, JUICE approfondirà la nostra comprensione di due temi al centro della Visione Cosmica di ESA: le condizioni per l'emergere della vita e il funzionamento del nostro Sistema Solare. [1]

3.1 Overview della missione

Jupiter ICy moons Explorer (JUICE) è una missione dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) selezionata dallo Space Programme Committee di ESA, ed è la prima missione su vasta scala nell'ambito del programma di esplorazione planetaria Cosmic Vision 2015-2025.

Con lancio previsto tra il 5 e il 25 aprile 2023, JUICE effettuerà osservazioni dettagliate di Giove e delle sue tre grandi lune ghiacciate - Ganimede, Callisto ed Europa - con una suite di strumenti di telerilevamento, geofisici e in situ.

La sonda arriverà nel sistema di Giove nel 2031, dopo aver sfruttato, a seconda della finestra di lancio, l'assistenza gravitazionale della Terra e di Venere oppure di Terra, Venere e Marte. Dopo una serie di flyby di Ganimede, Europa e Callisto,

JUICE entrerà in orbita attorno a Ganimede nel 2034 per una fase finale di studio che verrà completato nel 2035. Qui, effettuerà un'indagine approfondita della luna ghiacciata, cercando di conseguire una vasta serie di obiettivi scientifici. [1]

3.2 Obiettivi scientifici

La missione prevede diversi obiettivi scientifici volti a caratterizzare le lune di Giove. Ciò consentirà di ottenere un'indagine sull'evoluzione e sulla composizione chimica delle superfici e degli oceani sotterranei e di avere una valutazione dei processi che hanno interessato i satelliti e il loro ambiente nel tempo, concentrandosi principalmente su Ganimede e Callisto. Verrà rivolta l'attenzione anche su Europa, dove l'obiettivo principale sarà studiare la chimica essenziale per la vita, oltre a comprendere le caratteristiche superficiali e la composizione del materiale non ghiacciato. La missione caratterizzerà anche la diversità dei processi nel sistema di Giove che potrebbero essere necessari per fornire un ambiente stabile a Ganimede, Europa e Callisto su scale temporali geologiche, compreso l'accoppiamento gravitazionale tra i satelliti galileiani e la loro influenza mareale a lungo termine sul sistema nel suo complesso.

La strumentazione avanzata portata da JUICE (Fig. 3.1) permetterà anche nuovi studi approfonditi sull'atmosfera di Giove (struttura, dinamica e composizione) e sulla magnetosfera (proprietà tridimensionali del magnetodisco e dei processi di accoppiamento) e la loro interazione con i satelliti galileiani per migliorare ulteriormente la nostra comprensione dell'evoluzione e delle dinamiche del sistema gioviano.[1]

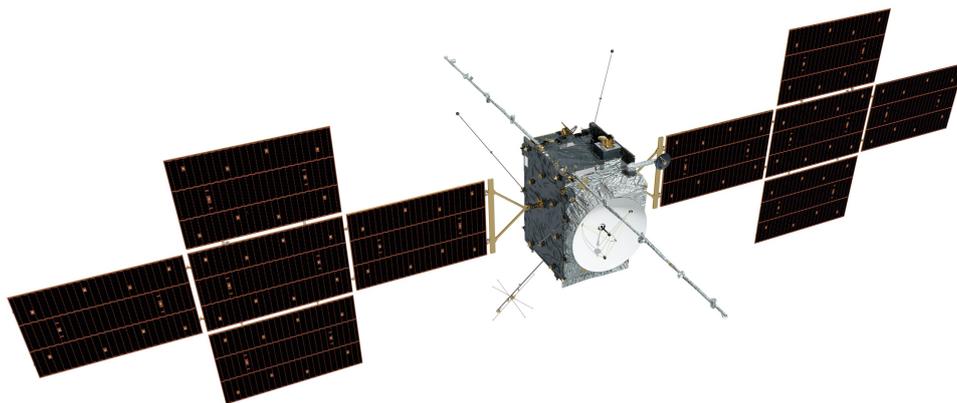


Figura 3.1: JUICE è dotato di numerosi strumenti scientifici altamente tecnologici, oltre che di grandi pannelli solari che lo riforniscono di energia. Crediti: ESA/ATG medialab

Per essere precisi e avere ben chiari tutti gli obiettivi scientifici della missione, essi sono stati riportati nella seguente tabella.

Esplorare zona abitabile: Ganimede, Europa e Callisto	
Ganimede come oggetto planetario e come possibile habitat	Caratterizzare l'estensione dell'oceano e la sua relazione con gli strati più interni
	Studiare la crosta ghiacciata
	Determinare la composizione globale, la distribuzione e l'evoluzione dei materiali di superficie
	Comprendere le caratteristiche di formazione della superficie e la ricerca di attività passate e presenti
	Caratterizzare l'ambiente locale e la sua interazione con la magnetosfera gioviana
Zone di Europa recentemente attive	Determinare la composizione del materiale non ghiacciato, soprattutto in relazione all'abitabilità
	Ricerca di acqua liquida sotto i siti più attivi.
	Studiare i processi recentemente attivi
Callisto come residuo del primo sistema gioviano	Caratterizzare gli strati esterni, compreso l'oceano
	Determinare la composizione del materiale non ghiacciato
	Studiare l'attività passata
Esplorare il sistema di Giove come archetipo dei giganti gassosi	
Atmosfera Gioviana	Caratterizzare le dinamiche atmosferiche e la circolazione
	Studiare la composizione atmosferica e chimica
	Caratterizzare la struttura verticale dell'atmosfera
Magnetosfera Gioviana	Visualizzare la magnetosfera come un veloce rotore magnetico
	Caratterizzare la magnetosfera come un gigante acceleratore
	Vedere le lune come sorgenti e pozzi di plasma magnetosferico
Il satellite Gioviano e i sistemi di anelli	Studiare l'attività e la composizione della superficie di Io
	Studiare le principali caratteristiche degli anelli e dei piccoli satelliti

Tabella 3.1: Riassunto degli obiettivi scientifici della missione JUICE

3.3 Design della missione

JUICE verrà lanciato nello spazio tramite il lanciatore Ariane 5 dallo spazioporto europeo di Kourou (Francia) tra il 5 e il 25 aprile 2023.

Il raggiungimento di Giove è previsto nel luglio 2031 grazie ad una serie di passaggi ravvicinati del sistema Terra-Luna, di Venere e della Terra. Una volta nel sistema gioviano, un gravity assist della più grande luna di Giove, Ganimede, aiuterà JUICE a entrare in orbita attorno al gigante gassoso. Prima della conclusiva Ganimede Orbital Phase, la sonda compirà anche alcune decine di flyby delle lune di Giove con orbite ad inclinazioni diverse rispetto al piano equatoriale del pianeta, con il duplice scopo di osservarle da vicino e sfruttarne la massa per alterare il proprio moto (Fig. 3.2).

L'avvicinamento a corpi celesti con masse molto maggiori di quella di una sonda artificiale, è infatti spesso (soprattutto durante le fasi di crociera) sfruttato per alterare i parametri orbitali della stessa, producendo un rallentamento o una accelerazione (fionda gravitazionale). [1]

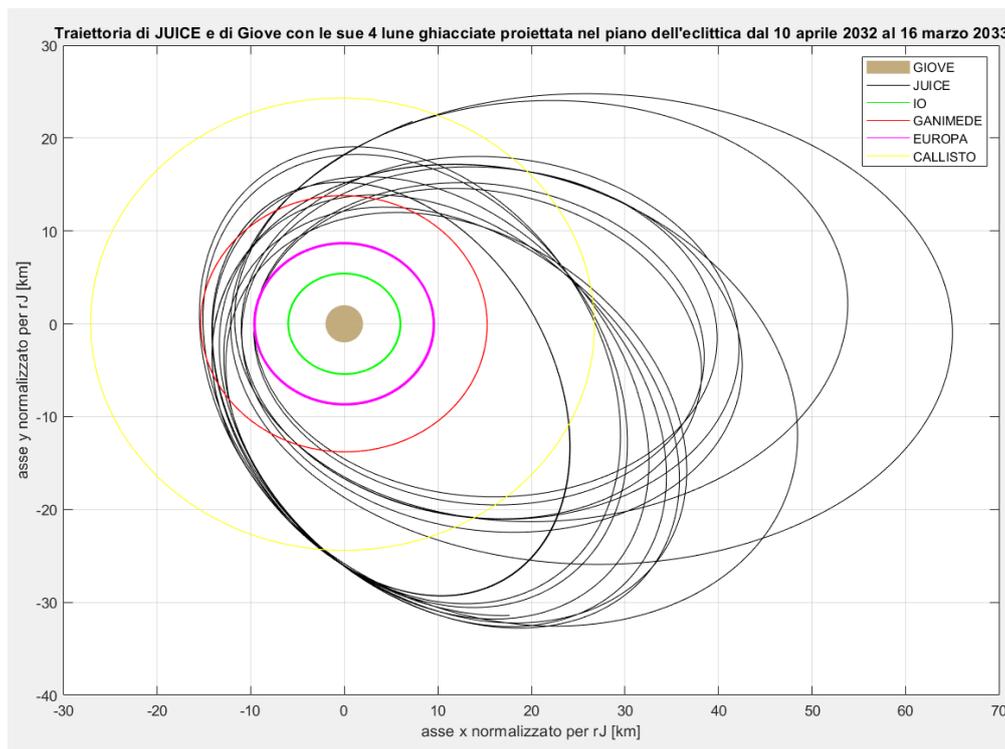


Figura 3.2: Traiettoria di JUICE rispetto a Giove e alle sue tre lune ghiacciate in un intervallo compreso tra il 10 aprile 2032 e il 16 marzo 2033. In figura si notano diverse intersezioni tra le orbite di JUICE e delle lune, spesso concomitanti con flyby. L'asse x e l'asse y sono normalizzati per il raggio di Giove.

Qui di seguito viene riportata la timeline completa della missione (Tab.3.2) aggiornata rispetto a quella presa come riferimento per l'analisi svolta (Vedi 5.1), in quanto costruita a partire dai kernel ¹ di JUICE più recenti.

La differenza tra il kernel usato e i più recenti si limita alla finestra di lancio, spostata da settembre 2022 ad aprile 2023 e ad alcuni passaggi specifici della fase di crociera. La science phase e dunque le opportunità di osservazioni bistatiche concomitanti con i flyby non cambiano. [5]

DATA	EVENTO O FASE
Aprile 2023	Lancio da Kourou tramite Ariane 5
Agosto 2024	Primo flyby della Terra
Agosto 2025	Flyby di Venere
Settembre 2026	Secondo flyby della Terra
Gennaio 2029	Terzo flyby della Terra
Luglio 2031	Inserimento nell'orbita di Giove
Luglio 2031 - Giugno 2032	Fase di riduzione di energia
Luglio 2032	2 flybys di Europa
Agosto 2032 - Agosto 2033	Fase inclinata di Giove - flyby di Callisto
Novembre 2033 - Novembre 2034	Fase di 'trasferimento verso Ganimede'
Dicembre 2034	Inserimento nell'orbita di Ganimede
Settembre 2035	Fine della missione

Tabella 3.2: Timeline della missione JUICE. Crediti: European Space Agency (ESA),2022

Alla luce di quanto detto sopra, considerando la timeline utilizzata durante l'analisi, la missione si può suddividere in due fasi principali:

1. **Trasferimento interplanetario (crociera) (7,6-9 anni):** data di inizio coincidente con settembre 2022 (mese e anno di partenza del file kernel spk utilizzato nell'analisi) e data di fine corrispondente a luglio 2031 con un primo flyby di Ganimede e la JOI (Jupiter Orbit Insertion). [1]
2. **Fase scientifica (2032-2035)** con particolare importanza alle fasi orbitali di Ganimede

¹Suite di file di dati manipolabili di diversi tipi (spk, pck, lk, ck, ek, lsk, fk...) , contenenti informazioni riguardanti corpi celesti, spacecraft, strumenti a bordo di sonde, sistemi di riferimento, ecc.

3.3.1 Fase scientifica

Una conoscenza qualitativa della traiettoria della sonda, soprattutto nella fase scientifica, sarà utile per indagare le opportunità di effettuare osservazioni scientifiche con requisiti geometrici particolarmente stringenti, come gli esperimenti di radar bistatico.

La parte della science phase di JUICE che precede la fase orbitale attorno a Ganimede è caratterizzata da diversi flyby di questa luna e di Callisto con lo scopo di inclinare l'orbita di JUICE rispetto all'equatore di Giove. Questo permetterà di esplorare le regioni polari e l'ambiente del pianeta a latitudini più elevate. [3] Sapendo che i flyby rappresentano punti di massima vicinanza della sonda ai pianeti bersaglio, per visualizzare in modo immediato la loro occorrenza, si è analizzata l'altitudine di JUICE sulle due lune dal 10 febbraio 2032 al 26 gennaio 2035.

In particolare viene riportata in figura 3.3 la distanza tra JUICE e la superficie di Ganimede. I flyby, opportunità privilegiate per fare osservazioni scientifiche ravvicinate delle lune, coincideranno con alcuni dei minimi locali dell'altitudine.

Lo stesso procedimento, anche se non riportato, è stato effettuato per individuare i flyby di Callisto.

In seguito, dato che i flyby hanno altitudini al closest approach sotto la quota di 15000 km [1], l'asse y è stato ingrandito (Fig. 3.4) tra 0 e 20000 km e si è andati ad inserire una linea orizzontale a 15000 km. Tutti i minimi locali dell'altitudine di JUICE al di sotto di questa soglia corrispondono a flyby di Ganimede da parte della sonda.

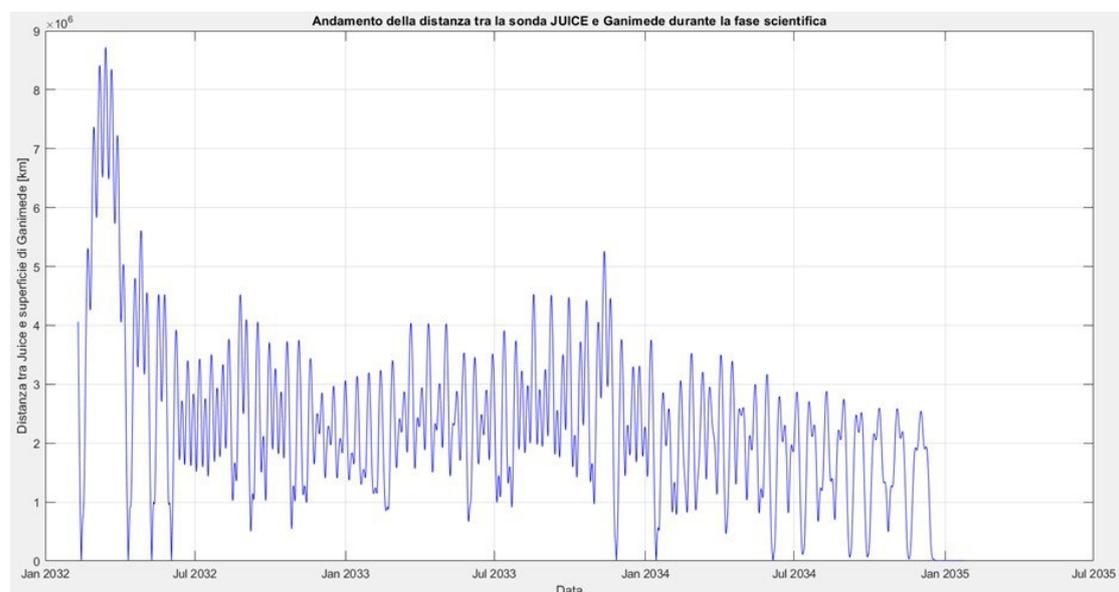


Figura 3.3: Andamento della distanza tra JUICE e la superficie di Ganimede tra il 10 febbraio 2032 e il 26 gennaio 2035

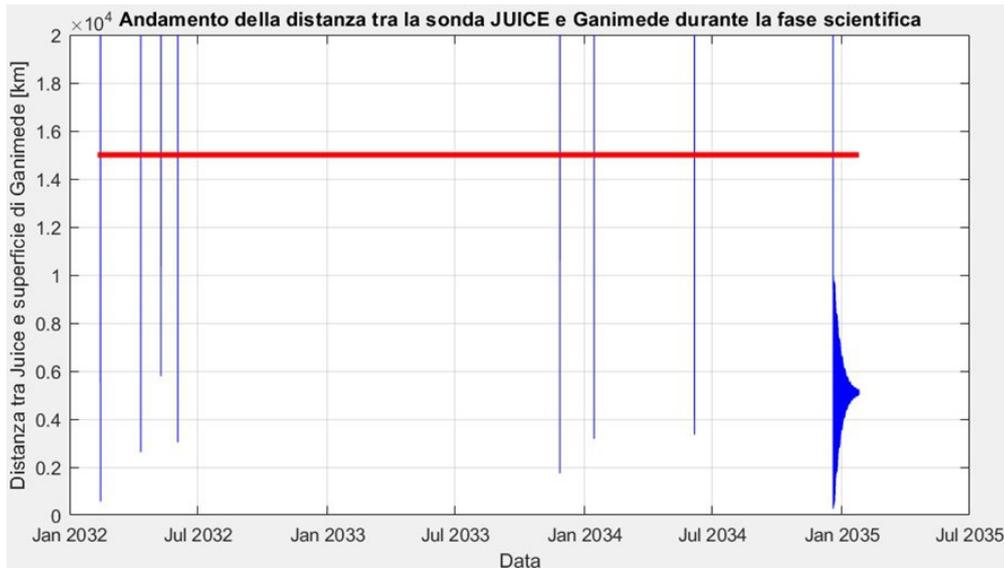


Figura 3.4: La linea rossa rappresenta un'altitudine pari a 15000 km, sotto alla quale si hanno dei flyby. Si noti dopo il dicembre 2034 come l'altitudine rispetto a Ganimede si faccia oscillante e sempre inferiore ai 10000 km per via dell'ingresso in orbita intorno alla luna.

Questo è stato ulteriormente verificato con un semplice esercizio di geometria tridimensionale, andando a prendere una delle date dove la distanza scendeva sotto il limite e facendo notare che la luna e JUICE risultano essere attaccate e dunque che è in corso un flyby. Per farlo vedere, è stato riportato il grafico 3.5 dove come epoca è stata presa una data coincidente con uno dei punti di minima altitudine di JUICE su Ganimede, per poi evidenziare con un marker le posizioni della sonda e della luna in quell'epoca specifica.

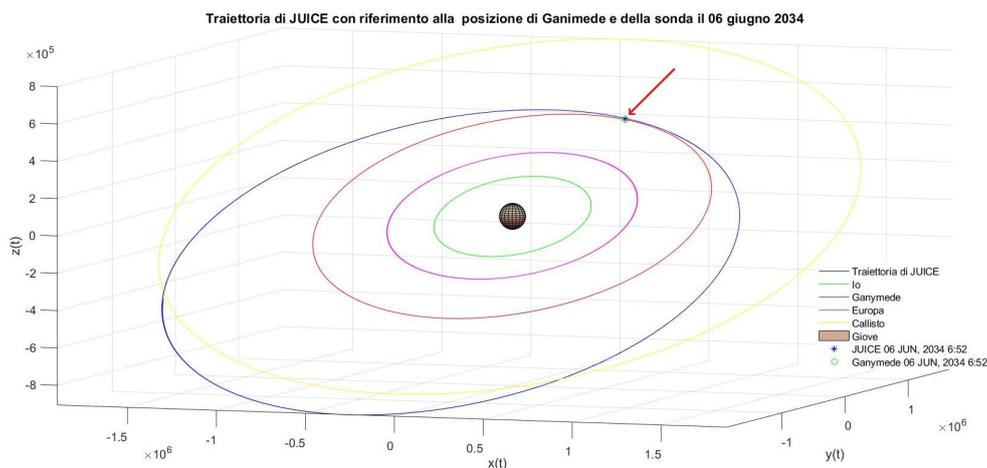


Figura 3.5: Traiettoria di JUICE con marker su posizioni della sonda e di Ganimede con Giove 3D al centro, in una data coincidente col flyby. Quindi si è preso l'intorno di un punto di tangenza e si è fatto vedere che per una data specifica, le posizioni delle lune e di JUICE sono molto vicine.

Terminati i numerosi flyby di Ganimede e Callisto, JUICE orbiterà attorno a Ganimede per circa nove mesi, con inizio nel dicembre 2034 e termine nel 2035 con la fine di GCO-500 (Orbita circolare a bassa quota).

3.3.2 Fase orbitale di Ganimede

Questa fase finale di missione prevede che JUICE descriva in successione quattro gruppi di orbite quasi-polari con ben distinte geometrie (Vedi Fig.3.6) [1]:

- Una prima fase composta da orbite ellittiche
- Un gruppo di orbite circolari ad alta quota, intorno ai 5000 km (GCO-5000)
- Una seconda fase ellittica
- Un gruppo di orbite circolari a bassa quota, intorno ai 500 km (GCO-500)

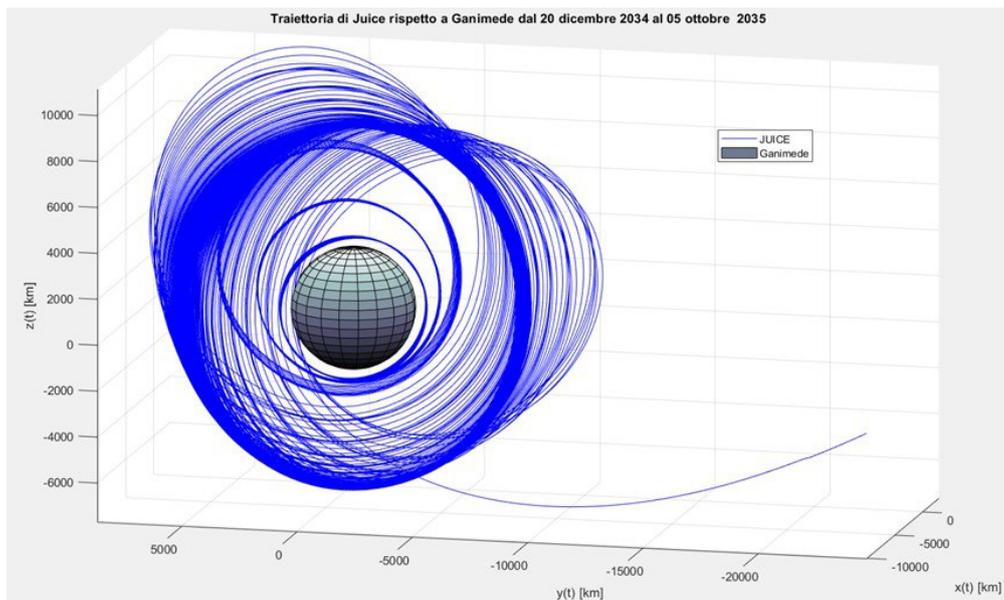


Figura 3.6: Traiettoria di JUICE rispetto a Ganimede dal 20 dicembre 2034 al 05 ottobre 2035. Si possono distinguere visivamente alcuni gruppi di orbite con caratteristiche simili: un gruppo di orbite più larghe, poi ve ne sono altre di restringimento e infine abbiamo la fase di orbita circolare a bassa quota attorno a Ganimede.

Le particolari strategie a livello di traiettoria, sono dovute al fatto che durante questa fase devono essere rispettati dei vincoli per evitare problemi relativi alle comunicazioni e alla fase scientifica di esplorazione in generale, oltre ad una ottimizzazione della durata di vita della sonda. I due fenomeni determinanti sono le perturbazioni orbitali dovute a Giove e il rischio di eclissi della sonda, alimentata ad energia solare, su orbite quasi-polari intorno a Ganimede. [1]

Nonostante l'importanza di questa lunga fase finale che darà modo alla sonda di fornire un'indagine completa del più grande satellite planetario del Sistema Solare, nel seguente elaborato si è scelto di limitare l'analisi delle opportunità per esperimenti di radar bistatico ai soli flyby.

3.4 Spacecraft

La sonda JUICE sarà stabilizzata a 3 assi e sarà dotata del più potente payload di sensori geofisici in situ che abbia mai volato nel sistema solare esterno.

Il sistema di propulsione si compone di un motore principale bi-propellente e di un set di 10 propulsori. Le due principali manovre di missione sono gli inserimenti orbitali di Giove e Ganimede. [3]

A bordo della sonda si avranno 10 strumenti all'avanguardia (Fig. 3.7), compreso l'esperimento chiamato 3GM, il quale utilizzerà il sistema di telecomunicazione del veicolo spaziale, insieme alle antenne riceventi di Terra, per effettuare esperimenti di radio scienza come le osservazioni bistatiche o le radio occultazioni atmosferiche (Cap. 3.4.1). Un'antenna ad alto guadagno di 2,5 m di diametro, che utilizzerà le bande X e Ka, con frequenze operative rispettivamente di 7.2-8.4 GHz e 32.5-34 GHz e lunghezze d'onda calcolabili come rapporto tra la velocità a cui si propaga l'onda e la sua frequenza, garantirà i collegamenti di telemetria/telecomando per le operazioni di routine e per gli esperimenti sopracitati. [3]

L'EPS² fornirà l'alimentazione elettrica a tutti i sistemi di bordo del satellite garantendo la continuità del servizio, controllerà e distribuirà la potenza andando a soddisfare i requisiti di assorbimento medi e di picco. La principale sorgente di potenza elettrica, saranno i grandi pannelli solari montati sui bracci esterni della sonda (Fig. 3.7), che convertiranno la radiazione elettromagnetica incidente direttamente in energia elettrica (effetto fotoelettrico). L'alimentazione della sonda dipende dall'intensità di illuminazione del pannello, la quale è funzione dei parametri orbitali che a loro volta definiscono angolo di incidenza della radiazione solare, periodo di eclissi e distanza dal Sole.

Il dimensionamento dei pannelli discende, quindi, da considerazioni sull'intensità solare durante tutte le fasi della missione, ed escludendo la possibilità di eclissi nelle fasi finali di orbita intorno a Ganimede. Quando JUICE si troverà nell'orbita di Ganimede, la normale incidenza della luce solare sui pannelli sarà mantenuta attraverso meccanismi di trasmissione a un asse combinati con una rotazione della sonda attorno all'asse nadir. [1]

²EPS sta per Electrical Power Subsystem, ed è il sottosistema che ha il compito di fornire, immagazzinare e distribuire l'energia elettrica del veicolo spaziale

Il payload di JUICE sarà in grado di affrontare tutti gli obiettivi scientifici della missione, e gli strumenti di cui sarà composto possono essere suddivisi in 3 gruppi:

- **Remote sensing:** strumenti focalizzati sull'osservazione a distanza di Giove e delle sue lune ghiacciate, delle loro superfici e della composizione delle loro atmosfere. Questo pacchetto include funzionalità di imaging spettrale dall'ultravioletto al vicino infrarosso, telecamere grandangolari e ad angolo stretto e uno strumento ad onda submillimetrica.
- **Geophysical:** gli strumenti permettono l'esplorazione della superficie e del sottosuolo delle lune utilizzando l'altimetria laser e lo scandagliamento radar, integrati dagli strumenti di radioscienza che sondano le atmosfere gioviane/satellitari e consentono la stima dei campi gravitazionali.
- **In situ:** strumenti in grado di fornire, una volta vicini, se non immersi all'interno dell'ambiente da analizzare, dati sulla magnetosfera di Giove e sui campi elettrici delle lune. [3]

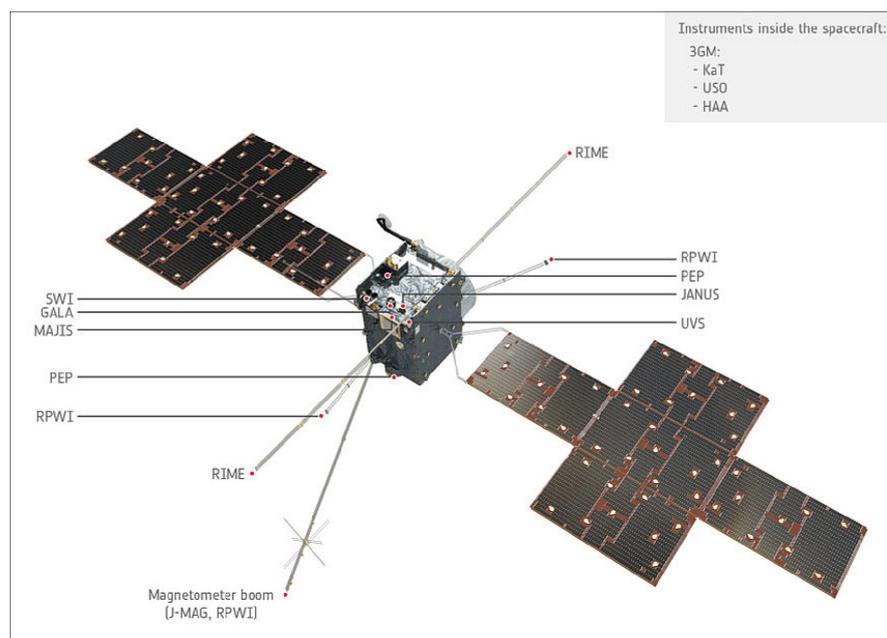


Figura 3.7: La sonda JUICE è dotata di numerosi strumenti scientifici altamente tecnologici, oltre che di grandi pannelli solari per l'alimentazione. Crediti: ESA/ATG medialab

3.4.1 Esperimento di radioscienza

Il 3GM, attraverso un ultra stable oscillator (USO), sfrutterà radio links in banda X e Ka per effettuare tutti gli esperimenti di radio scienza previsti dalla missione. Questi, in combinazione con l'altimetria e altre misurazioni, forniranno informazioni sui campi di gravità di Ganimede, Callisto ed Europa, sullo stato di deformazione mareale di Ganimede e Callisto, sulla presenza di variazioni di densità all'interno del guscio di ghiaccio di Ganimede e sulla dissipazione all'interno di Giove.

Sarà sempre l'esperimento 3GM che, oltre a studiare l'atmosfera neutra e la ionosfera di Giove e delle sue lune con radio occultazioni, potrà effettuare esperimenti di radar bistatico per studiare morfologia e proprietà elettriche della superficie di Callisto e Ganimede. [1]

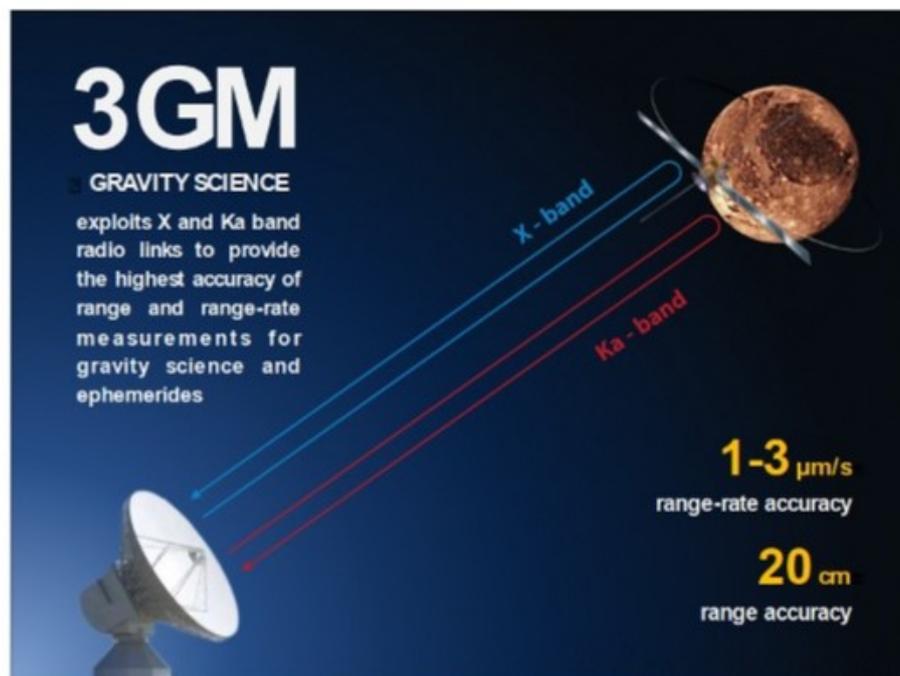


Figura 3.8: Esempio di utilizzo di 3GM. I segnali radio in banda X (linee blu) e banda Ka (linee rosse) vengono trasmessi dalla stazione di Terra al veicolo spaziale e coerentemente ritrasmessi sulla Terra mediante transponder a bordo del veicolo spaziale. [1]

Capitolo 4

Radar bistatico

Un radar bistatico (BSR) è un radar in cui trasmettitore e ricevitore sono separati tra di loro da una distanza non trascurabile. Al contrario, un radar in cui trasmettitore e ricevitore si trovano nella stessa posizione è chiamato radar monostatico. Anche se quest'ultimo risulta essere migliore nel campo del rilevamento della posizione di un obiettivo, diverse missioni spaziali hanno utilizzato geometrie bistatiche per studiare superfici planetarie, con l'obiettivo di caratterizzarne composizione e rugosità superficiale nell'ordine delle lunghezze d'onda dei segnali trasmessi (centimetri e metri). Dati raccolti sulla conformazione del terreno su scale proporzionali a centimetri e metri possono svolgere un ruolo fondamentale nella selezione di siti di atterraggio ed esplorazione futuri per lander e rover. [26]

4.1 Geometria dell'esperimento BSR

In applicazioni planetarie, il trasmettitore storicamente è a bordo del veicolo spaziale che orbita attorno al corpo bersaglio, mentre il ricevitore è sulla Terra (Fig. 4.1).

Dal punto di vista della propagazione delle onde, questa configurazione "downlink" è identica alla modalità "uplink", in cui le trasmissioni provenienti dalla Terra vengono ricevute dalla sonda dopo aver interagito con il pianeta.

Nonostante la miglior sensibilità ottenibile dagli esperimenti in uplink, quelli downlink sono più semplici da implementare grazie alle alte frequenze di campionamento e alla disponibilità di maggiore potenza di calcolo in una struttura a terra. Questo ha fatto sì che le osservazioni radar bistatiche siano state originariamente condotte come "esperimenti di opportunità" downlink. [26]

La figura 4.1 mostra schematicamente la geometria di un esperimento di radar bistatico (downlink). Con \mathbf{t} ed \mathbf{r} sono indicati rispettivamente i vettori di posizione del trasmettitore e del ricevitore.

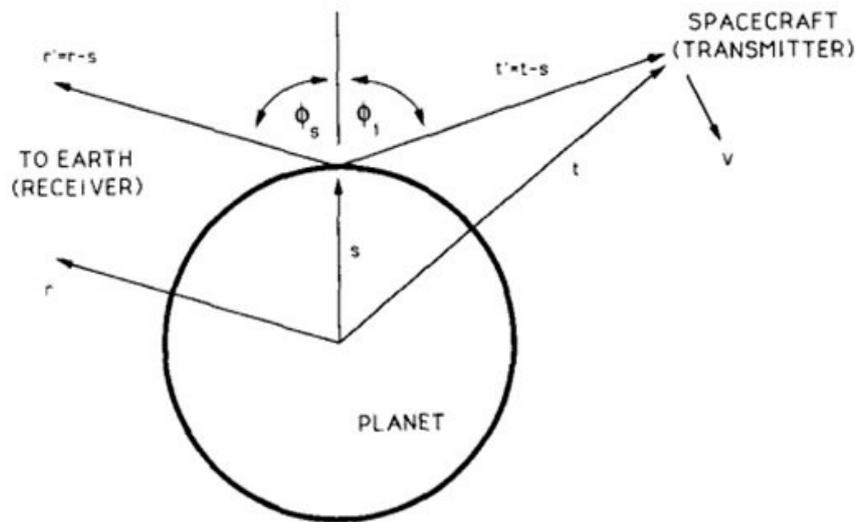


Figura 4.1: Geometria di un esperimento di radar bistatico con configurazione downlink. [26]

Affiché il segnale trasmesso dalla sonda impatti la superficie e sia poi riflesso in direzione speculare verso il ricevitore Terra, è necessario che l'antenna trasmittente illumini una zona precisa della superficie del pianeta bersaglio, univocamente individuata dalle posizioni reciproche di trasmettitore, bersaglio e ricevitore.

Questa regione è l'intorno di un punto geometrico chiamato punto speculare, la cui individuazione è il cuore dell'elaborato. Questo punto è quello in cui la riflessione avviene su un singolo piano ($\phi_a^1 = 0$), e gli angoli di incidenza e riflessione sono uguali ($\phi_i = \phi_s$).

Siccome l'area nell'intorno del punto speculare è quella che l'osservazione bistatica andrà a caratterizzare, confrontare la traccia a terra del punto con le aree di interesse di un pianeta è un buon criterio per valutare se valga la pena effettuare o meno l'esperimento.

Va sottolineato che il fatto che gli echi viaggino principalmente in direzione quasi speculare non è sempre vero, ma è un'ipotesi che viene spesso fatta a priori per progettare osservazioni di corpi di cui non si conoscono bene le caratteristiche superficiali. [26]

L'individuazione del punto speculare rappresenta uno dei punti più importanti del lavoro e l'algoritmo per la sua localizzazione, basato sulla risoluzione di un sistema non lineare e la sua opportuna condizione iniziale, verrà descritto successivamente (Vedi 5.3).

¹Angolo azimutale : angolo compreso tra il piano di incidenza e di osservazione

4.2 Polarizzazione e costante dielettrica

Tutte le geometrie bistatiche utilizzate per l'esplorazione planetaria in passato hanno sfruttato, come visto nel paragrafo precedente, la riflessione superficiale quasi speculare.

La figura 4.2 mostra in maniera schematica la geometria di un generico esperimento downlink effettuabile da JUICE.

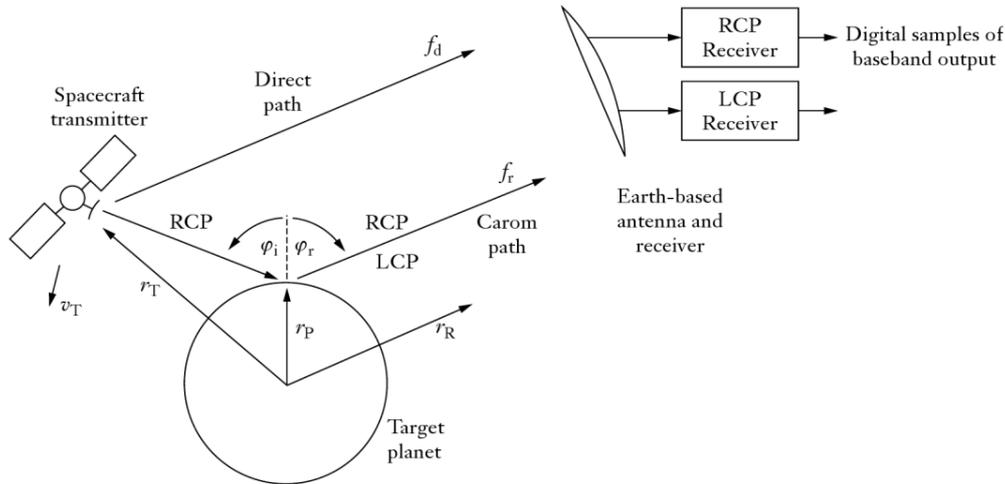


Figura 4.2: Esempio della geometria di un'osservazione bistatica in downlink con trasmissione polarizzata circolarmente in senso antiorario (right-sense). Attraverso il processo di riflessione della superficie, viene generata una componente polarizzata circolarmente in senso orario (left-sense). A Terra le due componenti polarizzate ortogonalmente vengono ricevute in modo separato. [9]

Quando un segnale trasmesso con una polarizzazione viene riflesso, la riflessione è in parte polarizzata come il segnale trasmesso e in parte polarizzata ortogonalmente. Un'onda elettromagnetica è descritta da un vettore di campo elettrico che è funzione di tempo e spazio. Se il campo elettrico giace sempre nello stesso piano allora un'onda si dice polarizzata linearmente. Se il piano è anche il piano sul quale si sviluppa la riflessione (quello contenente JUICE, Terra, punto speculare nell'analisi effettuata), la polarizzazione si dice lineare e verticale. Se invece il campo elettrico giace nel piano normale a quello di riflessione si parla di polarizzazione orizzontale. [29]

$$R_H = \frac{\cos\phi - \sqrt{\epsilon - \sin^2\phi}}{\cos\phi + \sqrt{\epsilon - \sin^2\phi}} \quad (4.1)$$

$$R_V = \frac{\epsilon \cos\phi - \sqrt{\epsilon - \sin^2\phi}}{\epsilon \cos\phi + \sqrt{\epsilon - \sin^2\phi}} \quad (4.2)$$

R_H ed R_V (4.1 e 4.2) sono i coefficienti di riflessione di Fresnel, e i loro moduli al quadrato possono essere interpretati come frazioni di potenza polarizzata V (verticalmente) e H (orizzontalmente) dopo una riflessione da parte di un terreno con costante dielettrica relativa ϵ . [26]

Le analisi che vengono riportate si concentreranno sul principale materiale che ci aspettiamo costituisca la superficie di Ganimede e che è stato confermato anche dalla modellazione spettrale riportata dallo studio di N.Ligier et al. [20]: ghiaccio d'acqua. La sua costante dielettrica risulta essere pari a $\epsilon = 3.1$.

È bene ricordare che JUICE, non trasmette con polarizzazione lineare, ma con polarizzazione circolare² e le due componenti riflesse saranno polarizzate SC (same-sense circular polarization), ovvero stesso senso del segnale trasmesso, ed OC (opposite-sense circular polarization), segno opposto. L'ampiezza delle due parti polarizzate del segnale riflesso è descritta dai coefficienti di riflessione della tensione di Fresnel, che sono dipendenti dalla costante dielettrica (ϵ) della superficie di riflessione e dall'angolo speculare (θ) della geometria bistatica. [26]

Per una polarizzazione circolare come quella implementata da JUICE si ha:

$$R_{SC} = \frac{R_V + R_H}{2} \quad (4.3)$$

$$R_{OC} = \frac{R_V - R_H}{2} \quad (4.4)$$

La riflettività della superficie $\eta(\phi)$, diversa e ottenibile per entrambe le polarizzazioni ortogonali, è definita come il rapporto tra l'effettiva potenza dell'eco e la potenza attesa da una superficie perfettamente conduttiva, e può essere calcolata come il quadrato dei coefficienti di riflessione della tensione di Fresnel. [26]

Siccome la potenza attesa da una superficie perfettamente conduttiva non dipende dalla polarizzazione, il rapporto tra potenze può essere facilmente legato al rapporto tra riflettività, a sua volta dipendente da angolo di incidenza e dielettrica (Eq. 4.5).

Questo permette di trovare la dielettrica senza passare per la modellazione della potenza attesa, che è funzione dei vari parametri dell'equazione radar. [27]

$$\frac{P_{SC}}{P_{OC}} = \frac{\eta_{SC}}{\eta_{OC}} = \frac{|R_{SC}|^2}{|R_{OC}|^2} \quad (4.5)$$

²Polarizzazione circolare: il vettore dell'intensità di campo ruota in senso orario o antiorario perpendicolarmente alla direzione di propagazione. Essa è creata da due antenne polarizzate linearmente alimentate a 90° fuori fase e simultaneamente ruotate meccanicamente di 90°.

Durante un'osservazione bistatica si ricevono le frazioni di segnale polarizzate ortogonalmente, si calcolano le potenze e il loro rapporto, e conoscendo l'angolo di incidenza si estrae la costante dielettrica risolvendo il sistema di equazioni da 4.1 a 4.5.

Come è stato già accennato, nella nostra analisi il valore della ϵ è un input per indagare la maggiore o minore qualità di un'opportunità di osservazione bistatica in funzione dell'angolo di incidenza. Il motivo di questo risiede nel sistema di equazioni sopracitato, ed è spiegato nella sezione che segue.

4.3 Angolo di Brewster

L'angolo di Brewster è un particolare angolo Φ_B tale per cui se un'onda polarizzata in qualsiasi modo incide su una superficie proprio a Φ_B , si trova che l'onda riflessa è polarizzata perpendicolarmente al piano di propagazione. All'angolo di Brewster la componente polarizzata verticalmente del campo elettrico è zero [26].

Risolvendo l'equazione di R_V (4.2) e imponendola uguale a zero si può notare che ogni materiale, con la propria ϵ , ha un proprio angolo di Brewster dato dalla seguente formula:

$$\Phi_B = \arctan(\epsilon^{0.5}) \quad (4.6)$$

In questa particolare condizione il rapporto tra potenze di segnali polarizzati circolarmente è uguale ad 1 (vedi equazione 4.5), in quanto si ha $R_V = 0$. Per evitare valori di rapporto di potenza molto grandi o molto piccoli, requisito importante perché quantificare in modo esatto la potenza più debole può essere complicato per via del rumore, è sempre meglio affidarsi alle osservazioni BSR effettuate in prossimità dell'angolo di Brewster.

Nel caso del bistatico su Ganimede, abbiamo calcolato un angolo di Brewster ottimo utilizzando la costante dielettrica del ghiaccio d'acqua ($\epsilon = 3.1$) e che risulta essere pari a $\Phi_B = 60.405^\circ$. Questo significa che più l'esperimento è fatto ad angoli di incidenza vicini a quello di Brewster più il rapporto delle potenze sarà vicino ad 1, e le stime di dielettrica ottenibili dall'esperimento saranno accurate.

Capitolo 5

Analisi delle opportunità per esperimenti di BSR su Ganimede

In accordo con gli obiettivi della missione, il 3GM, sfrutterà radio links in banda X e Ka per effettuare gli esperimenti di radioscienza.

Nel redbook dell'ESA [1] si fa riferimento alla possibilità di fare osservazioni bi-statiche, ma non sono state pianificate finestre specifiche per effettuare questo esperimento.

Studiare la geometria della missione e trovare, dopo aver individuato dei buoni criteri di valutazione (Brewster per $\epsilon=3.1$), finestre valide per fare questo tipo di osservazione, sarà l'obiettivo principale dell'analisi.

Molte delle informazioni necessarie per analizzare adeguatamente queste possibilità di osservazione, sono disponibili nel sito NASA Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF). [16]

Tutto ciò che riguarda la geometria del problema è stato modellato su Matlab con l'aiuto del toolkit SPICE nella sua versione MICE distribuito dal NAIF.

La posizione di JUICE, Terra, Ganimede e l'orientamento della sonda, così come l'intersezione tra la superficie della luna e la bisettrice tra la posizione di Terra e JUICE in IAU_GANYMEDE, sono disponibili come vettori nel tempo, una volta acquisita una buona comprensione del toolkit, dei suoi kernels e delle sue funzioni principali.

5.1 SPICE e i suoi kernels

SPICE è stato sviluppato ed è gestito dal team Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) del Jet Propulsion Laboratory sotto la direzione del Planetary Science Division della NASA. Esso è un sistema informativo che permette di fornire la geometria necessaria per pianificare le osservazioni scientifiche e analizzare i dati restituiti da tali osservazioni. È possibile, utilizzando questo strumento, effettuare calcoli complessi che ci forniscono dati sulle varie missioni spaziali come ad esempio traccia a terra, vettori di posizione e velocità, conversioni tra varie scale temporali e moltissime altre applicazioni.

I set di dati manipolabili con SPICE, contenenti informazioni riguardanti corpi celesti, sonde/satelliti artificiali, strumenti a bordo di sonde, sistemi di riferimento, ecc... sono chiamati kernel e ve ne sono di diversi tipi (spk, pck, lk, ck, ek, lsk, fk...). Nel caso specifico del seguente elaborato, i kernels utilizzati per l'analisi della traiettoria e delle opportunità per gli esperimenti BSR sono i seguenti:

- **SPK** (spacecraft and planet kernel): contengono le effemeridi¹ di spacecraft, pianeti, satelliti naturali, comete, asteroidi e stazioni di terra. In particolare i file utilizzati sono stati **juice_mat_crema_5_0_20220826_20351005_v01** e **jup365**, contenenti rispettivamente le effemeridi della sonda JUICE e di Terra, Luna e gli altri corpi del sistema solare. Il kernel spk di JUICE utilizzato non è il più aggiornato reso disponibile sul sito di ESA. L'ultima versione della traiettoria differisce da quella utilizzata di seguito solo per la data di lancio e alcuni passaggi della fase di crociera, spostata da settembre 2022 ad aprile 2023, ma la science phase rimane inalterata. [2]
- **LSK** (leap second kernel): necessari per eseguire conversioni tra diverse scale temporali. Quello utilizzato nell'analisi è il **naif0012** per convertire, tra le scale temporali TDB e UTC, il tempo rispetto ad un istante di partenza.
- **PCK** (planetary constants kernel): contengono dimensioni, forma e dati di orientamento associati ai corpi naturali del Sistema Solare, oltre ai sistemi di riferimento solidali ai pianeti. Nello specifico si è fatto uso del kernel **pck00010**.

Per quanto riguarda le principali funzioni utili per l'analisi vi sono:

- **furnsh**: carica un singolo kernel o una raccolta di kernel.

¹Tabelle che contengono valori calcolati nel tempo di diverse grandezze astronomiche variabili. In particolare abbiamo informazioni di posizione e velocità di ogni corpo celeste presente nello spazio, fondamentali per l'analisi della traiettoria

- **str2et**: converte una stringa che individua un'epoca in un valore in doppia precisione che rappresenta il numero di secondi nella scala temporale TDB (Tempo dinamico baricentrico), oltre l'epoca J2000 corrispondente all'epoca di input.
- **spkpos**: funzione che restituisce il vettore posizione di un corpo rispetto ad un altro (observer) in uno specifico sistema di riferimento, ad un dato istante di tempo. Il comando dà anche la possibilità di correggere l'aberrazione planetaria e quella stellare, ma nell'analisi questo aspetto è stato trascurato (per l'input "ABCORR", si è inserito 'NONE').
- **reclat**: converte le coordinate rettangolari (cartesiane) in latitudine e longitudine.
- **gfoct**: determina gli intervalli di tempo in cui un osservatore vede il target occultato da un altro corpo.

5.2 Geometria e Timeline

Lo spacecraft ha una fase di flyby delle varie lune di Giove prima di entrare in orbita intorno a Ganimede. Questa è la fase di interesse per lo studio proposto in questo elaborato dove le opportunità di effettuare esperimenti di radar bistatico sono indagate nell'intorno dei flyby.

Gli esperimenti di BSR permettono di osservare la superficie nell'intorno di un punto di riflessione: il punto speculare s (Vedi Fig. 4.1) che verrà ampiamente descritto nel paragrafo 5.3.

La distanza minima raggiungibile da JUICE rispetto a Ganimede durante un flyby potrebbe venire toccata alle spalle della luna galileiana rispetto alla Terra o di fronte ad essa. Nel primo caso, lo spacecraft passa dietro il pianeta, e questo impedisce comunicazione con la Terra per un tempo finito: si ha quindi una occultazione. Questa condizione è una finestra che inizia e finisce con l'angolo di incidenza a 90° (tangenza del radio link con la superficie di Ganimede), e nella quale viene negata la possibilità di fare osservazioni in quanto non si può trovare il punto speculare. Per questo motivo, un'analisi relativa agli angoli di incidenza, riportati in funzione del tempo nel capitolo 6, durante i vari flyby della luna, è in grado di rivelare la possibile presenza di finestre di occultazione che spezzeranno l'osservazione bistatica.

Chiaramente ogni flyby ha la sua geometria, timeline, traccia a terra e punto speculare e quindi è bene analizzarli separatamente.

Qui di seguito viene riportata una tabella (tab. 5.1) che rappresenta una overview dei sette flyby di Ganimede in cui viene specificata data di inizio, fine e closest approach.

Flyby di Ganimede	Closest Approach (ET)	Data di inizio e fine
G01	13/02/2032 23:07	13/02/2032 11:07 14/02/2032 11:07
G02	11/04/2032 04:17	10/04/2032 16:17 11/04/2032 16:17
G03	09/05/2032 18:37	09/05/2032 06:37 10/05/2032 06:37
G04	02/06/2032 21:32	02/06/2032 09:32 03/06/2032 09:32
G05	27/11/2033 06:22	26/11/2033 18:22 27/11/2033 18:22
G06	14/01/2034 18:42	14/01/2034 06:42 15/01/2034 06:42
G07	06/06/2034 06:52	05/06/2034 18:52 06/06/2034 18:52

Tabella 5.1: Timeline dei sette flyby di Ganimede. È stata riportata la data di inizio, di fine e quella corrispondente al closest approach (avvicinamento massimo).

Per ogni osservazione, la traiettoria di JUICE durante i flyby, la posizione di Ganimede e di tutti i corpi di interesse, sono stati modellati usando i kernels spk e pck descritti nel paragrafo 5.1, senza tener conto dell'effetto del 'tempo luce'.

Ad ogni istante di tempo, il punto speculare teorico, fondamentale per le analisi, è stato calcolato in coordinate rettangolari con un algoritmo numerico che richiede un'attenzione non indifferente e che viene spiegato nel dettaglio nel paragrafo successivo.

5.3 Algoritmo per il calcolo del punto speculare

Uno degli obiettivi principali della tesi è stato quello di realizzare uno script in grado di individuare il punto speculare tra la Terra, JUICE e Ganimede (pensato come un ellissoide) nel tempo. La sua posizione, fissata la geometria, risulta essere unica e il punto è sempre esistente a meno che non si abbia un'occultazione.

Nello specifico, quando in occultazione, la sonda è dietro Ganimede rispetto alla Terra, per cui non esiste radio link che connetta JUICE con quest'ultima, come vedremo nel capitolo 6.

Il punto speculare è il punto in cui il segnale trasmesso da JUICE, assumendo esso rimbalzi in maniera speculare sulla superficie media del pianeta (si trascurano

montagne e qualsiasi altra forma di rugosità di ampia scala, e si pensa Ganimede come un ellissoide), raggiungerà la Terra. Siccome fisicamente un segnale non è mai un raggio, ma un fascio, il punto speculare sarà il centro della regione di Ganimede che, se illuminata da JUICE, rifletterà verso Terra. Questa zona corrisponde a quella che verrà caratterizzata dall'esperimento. [26]

La logica dello script è unica ed è stata poi iterata per le diverse finestre temporali corrispondenti ai vari flyby della luna di Giove.

Dopo aver costruito un vettore di istanti di tempo con un passo arbitrario, per ogni istante si è andati a calcolare il punto speculare. L'obiettivo successivo è stato quello di trovare la traccia sulla mappa di Ganimede di questi punti nell'intorno dei flyby della luna al muoversi di JUICE, Ganimede e Terra (± 12 ore dal closest approach). Per fare questo, dopo aver convertito da coordinate cartesiane a geografiche (latitudine e longitudine) i punti speculari ottenuti, si è andati a fare una proiezione rettangolare sulla mappa di Ganimede generata dalla combinazione di immagini Voyager 1 e 2 e Galileo. [18]

A livello computazionale, per ogni istante di tempo, il punto speculare teorico $\mathbf{x}=(x,y,z)$, espresso nel riferimento IAU_GANYMEDE², è stato calcolato in coordinate rettangolari sulla superficie di Ganimede con una routine numerica.

L'idea che sta dietro all'algoritmo è quella di risolvere un sistema con tre vincoli geometrici espressi da equazioni non lineari. In particolare, dopo aver ottenuto \mathbf{r} e \mathbf{t} , che sono rispettivamente i vettori posizione di Terra e JUICE nel sistema IAU_GANYMEDE, $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ versore normale alla superficie ellissoidale di Ganimede nel punto speculare \mathbf{x} e $L\hat{o}S = \frac{\mathbf{r}-\mathbf{t}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{t}\|}$ che è la linea di vista da JUICE alla Terra, il sistema di equazioni non lineari che deve essere risolto per trovare il punto speculare è il seguente:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (5.1)$$

$$Det \begin{bmatrix} \mathbf{x}-\mathbf{t} & \mathbf{n}(\mathbf{x}) & L\hat{o}S \end{bmatrix} = Det \begin{bmatrix} x-t_x & n_x(\mathbf{x}) & L\hat{o}S_x \\ y-t_y & n_y(\mathbf{x}) & L\hat{o}S_y \\ z-t_z & n_z(\mathbf{x}) & L\hat{o}S_z \end{bmatrix} = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\mathbf{r}-\mathbf{x}}{\|\mathbf{r}-\mathbf{x}\|} \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) - \frac{\mathbf{t}-\mathbf{x}}{\|\mathbf{t}-\mathbf{x}\|} \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) = 0 \quad (5.3)$$

Ogni equazione del sistema è un vincolo geometrico sul punto speculare.

L'equazione 5.1 è l'appartenenza del vettore \mathbf{x} (poiché il punto speculare sarà un vettore nel riferimento IAU_GANYMEDE) all'ellissoide di Ganimede che, in realtà, nel kernel pck utilizzato è modellato come una sfera e infatti risulta $a=b=c=2631.2$ km che corrisponde al raggio della luna.

²Nome del sistema di riferimento in SPICE. Rappresenta un sistema di riferimento rotante con Ganimede e allineato con i tre assi del suo ellissoide.

La seconda equazione 5.2 è la planarità della riflessione, cioè il fatto che la normale locale, le congiungenti punto speculare-Terra e punto speculare-JUICE siano complanari. Per fare questo si è andati a definire anche \mathbf{n} , versore normale alla superficie ellissoidale nel punto speculare. La normale locale ad una superficie è il gradiente della sua equazione. Nel caso analizzato, l'equazione dell'ellissoide è la prima del sistema, per cui si è andati semplicemente a fare il suo gradiente.

Per una questione di chiarezza e riduzione di errore numerico da parte del calcolatore, sono state aggiunte alle precedenti, tre equazioni che descrivono le componenti x,y,z del vettore normale:

$$n_x = \frac{2x}{a^2} \quad (5.4)$$

$$n_y = \frac{2y}{b^2} \quad (5.5)$$

$$n_z = \frac{2z}{c^2} \quad (5.6)$$

Per quanto riguarda il significato fisico dell'equazione 5.2, è quello di porre il determinante della matrice fatta dai 3 vettori colonna uguale a zero. Questo è dovuto al fatto che quando si pone il determinante uguale a zero, significa che i vettori sono linearmente dipendenti e se 3 vettori sono linearmente dipendenti allora sono complanari.

L'ultima equazione (5.3) impone che la riflessione sia speculare (angolo di incidenza uguale all'angolo di riflessione), quindi che le proiezioni delle due congiungenti citate sopra lungo la normale locale, siano uguali.

La soluzione del sistema non lineare è stata calcolata attraverso la funzione built-in `fsolve` che risolve il sistema prendendo in input una condizione iniziale $\mathbf{x0}$. Questo valore iniziale è un primo guess della posizione del punto speculare e quindi per semplicità è stato preso come l'intersezione tra la superficie di Ganimede e la bisettrice tra \mathbf{t} ed \mathbf{r} .

Una volta calcolati i vari punti speculari attraverso la procedura iterativa descritta, si è andati a convertirli in coordinate rettangolari: longitudine, latitudine e raggio nel sistema di riferimento IAU_GANYMEDE, per poi effettuare la traccia a terra sulla mappa di Ganimede e fare tutte le valutazioni necessarie al fine di capire se il punto speculare ricopra o meno delle zone di interesse particolari.

5.3.1 Check geometrico

La qualità della stima è stata verificata confrontando la direzione del raggio riflesso dal punto speculare stimato, con la linea di vista tra quest'ultimo e la Terra.

A livello numerico si è fatto riferimento alla geometria con particolare attenzione a verso e direzione dei vettori in gioco. Si è preso il versore che punta verso JUICE dal punto speculare trovato ma con segno opposto e questo rappresenta il versore del raggio incidente su Ganimede. A sua volta è stato scomposto in due vettori: uno nella direzione della normale locale al punto speculare e che identifica la componente normale, ed un altro, calcolato come la differenza tra versore e componente normale, che, in quanto appartenente al piano tangente di Ganimede al punto speculare, viene classificato come componente tangente.

In questo modo si è a conoscenza delle due componenti del versore incidente. Il versore del raggio riflesso, avrà lo stesso componente tangente e il componente normale opposto rispetto a quello del raggio incidente. Così, sommando i vettori, si è stati in grado di ottenere il versore del raggio riflesso che, come detto precedentemente, deve essere confrontato con la congiungente tra il punto speculare stimato e la Terra, calcolando la separazione angolare tra le due direzioni.

Quest'ultima è stata quantificata e successivamente tracciata in funzione del tempo (Fig. 5.1) per individuare i valori anomali nella routine numerica. Tale separazione è risultata essere dell'ordine di 10^{-2} e 10^{-3} gradi, stima valutata accettabile per lo scopo dell'analisi proposta, concentrata maggiormente sul comportamento degli angoli di incidenza, e molto genericamente sulla posizione della traccia a Terra.

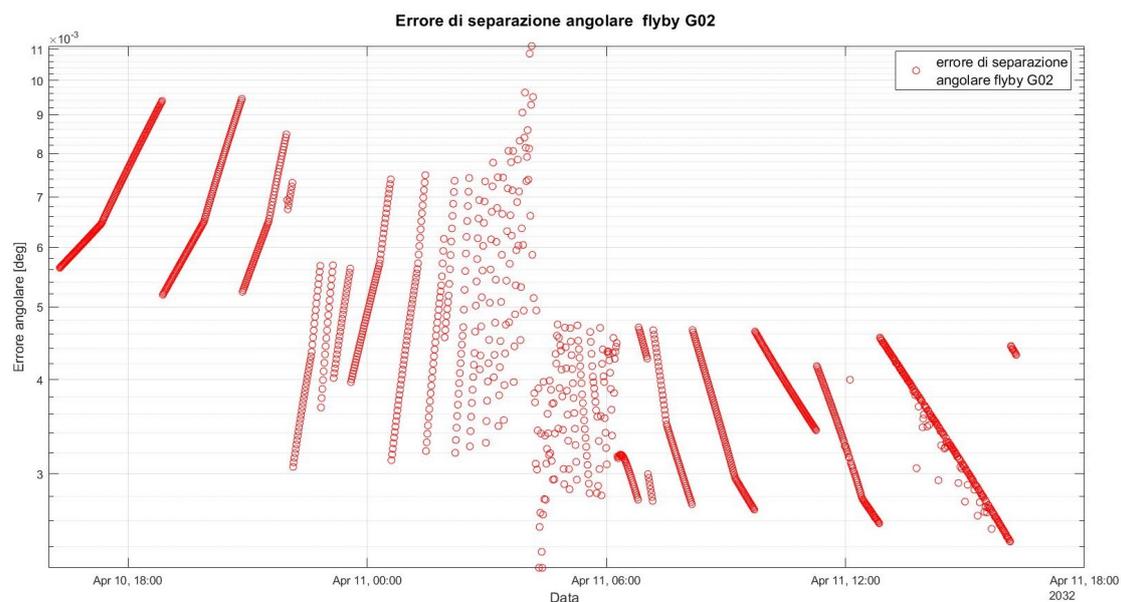


Figura 5.1: Esempio di check geometrico ottenuto confrontando il raggio riflesso con la congiungente punto speculare-Terra nel corso del flyby G02, nomenclatura di riferimento tab. 5.1

Capitolo 6

Risultati ottenuti

Questa parte della tesi è dedicata alla raccolta dei risultati relativi all'analisi delle opportunità della sonda JUICE di effettuare esperimenti BSR sulla superficie di Ganimede. Durante la presentazione vengono riportati anche alcuni commenti e interpretazioni dei risultati sulla base dello studio di esperimenti passati con particolare attenzione ai requisiti sulla geometria necessaria per ottenere il collegamento radio tra JUICE e la Terra e sulla relazione tra angolo di incidenza e costante dielettrica superficiale.

Le uniche opportunità per fare osservazioni scientifiche ravvicinate della luna ghiacciata sono brevi finestre temporali nell'intorno dei punti di minima altitudine di JUICE su Ganimede e per questo motivo vengono analizzati i sette flyby (vedi tab. 5.1) attorno alla luna, seguendo un comune approccio.

Vengono riportate la traccia a terra dei punti speculari sulla mappa di Ganimede (presa da [18]), il controllo degli angoli di incidenza in quanto, dagli studi passati [28], si è visto che più questo è vicino all'angolo di Brewster della superficie riflettente, più sarà accurata la stima della costante dielettrica, e infine si è caratterizzato l'andamento dell'altezza di JUICE rispetto a Ganimede. In tutti i casi si è evidenziata anche la quota minima corrispondente al closest approach.

Dal momento che lo studio parte dalla premessa che la superficie di Ganimede sia in massima parte ricoperta da ghiaccio d'acqua, l'angolo di Brewster è stato calcolato a partire da $\epsilon = 3.1$ [28]. Durante l'analisi si è preso un intervallo di validità più ampio, in particolare per un rapporto di potenze variabile da 0.2 a 5 [28], gli angoli per cui si rientra in questo range sono quelli compresi tra 47° e 73° . (Fig. 6.1)

Nei vari grafici sono stati riportati allo stesso modo sia gli intervalli dell'angolo di incidenza che l'angolo di Brewster, il tutto per rendere più intuitive e chiare le considerazioni effettuate.

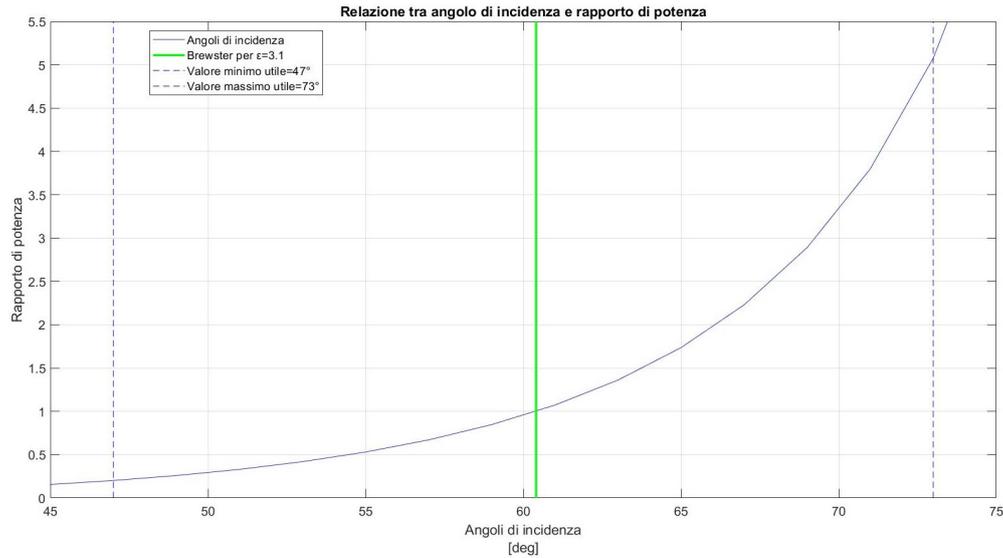


Figura 6.1: Grafico del rapporto di potenza al variare dell'angolo di incidenza. In verde è rappresentato l'angolo di Brewster per $\epsilon = 3.1$, mentre gli estremi del range di validità degli angoli di incidenza è evidenziato con linee tratteggiate di colore blu.

6.1 Flyby G01, G02 e G03

I flyby G01, G02 e G03 sono stati analizzati insieme in quanto presentano caratteristiche molto simili. Nella traccia a terra, rappresentata in figura 6.2 con tre colori diversi, si può notare come gli andamenti dei punti speculari sulla superficie di Ganimede abbiano caratteristiche affini. Riferendoci alla copertura superficiale, si può osservare solo una fascia equatoriale in uno specifico intervallo di longitudini più o meno variabile tra i tre flyby. Essi, non offriranno la copertura dei poli, in quanto nessun punto speculare passa in quelle zone. La regione osservabile è quindi piuttosto limitata e concentrata solo sulla fascia equatoriale.

Le stesse analogie si possono vedere negli angoli di incidenza e nel grafico dell'altitudine JUICE-Ganimede (Fig. 6.3), dove si può osservare un comportamento ricorrente in tutti e tre i casi. Controllando le figure si nota che tutti quanti i flyby sono senza occultazione, nessun valore dell'angolo di incidenza supera i 90° .

Ai fini dello studio, è importante notare che gli angoli di incidenza non sono affatto buoni per poter sfruttare questi flyby per fare esperimenti di radar bistatico.

Avendo analizzato l'effetto che ha l'angolo di incidenza sull'accuratezza delle possibili stime di costante dielettrica superficiale, e sapendo che l'intervallo utile risiede in angoli compresi tra 47° e 73° , rappresentati con linee blu tratteggiate nei grafici (Fig. 6.3), si può concludere che i flyby G01, G02 e G03 non sono delle valide finestre temporali in grado di soddisfare i requisiti necessari per l'osservazione.

6.1. Flyby G01, G02 e G03

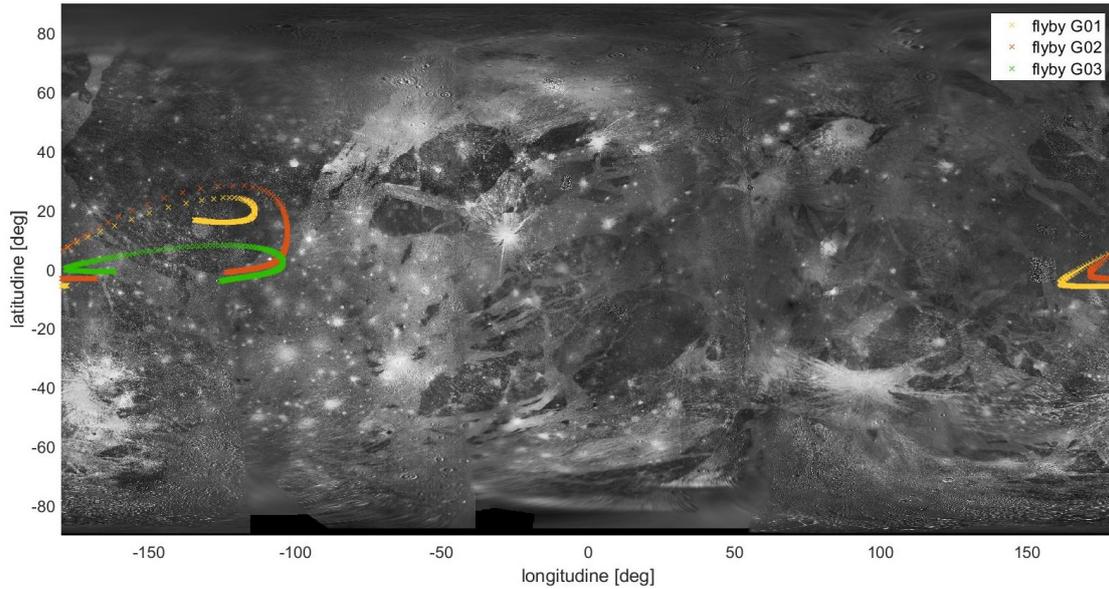


Figura 6.2: Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno dei flyby G01, G02 e G03.

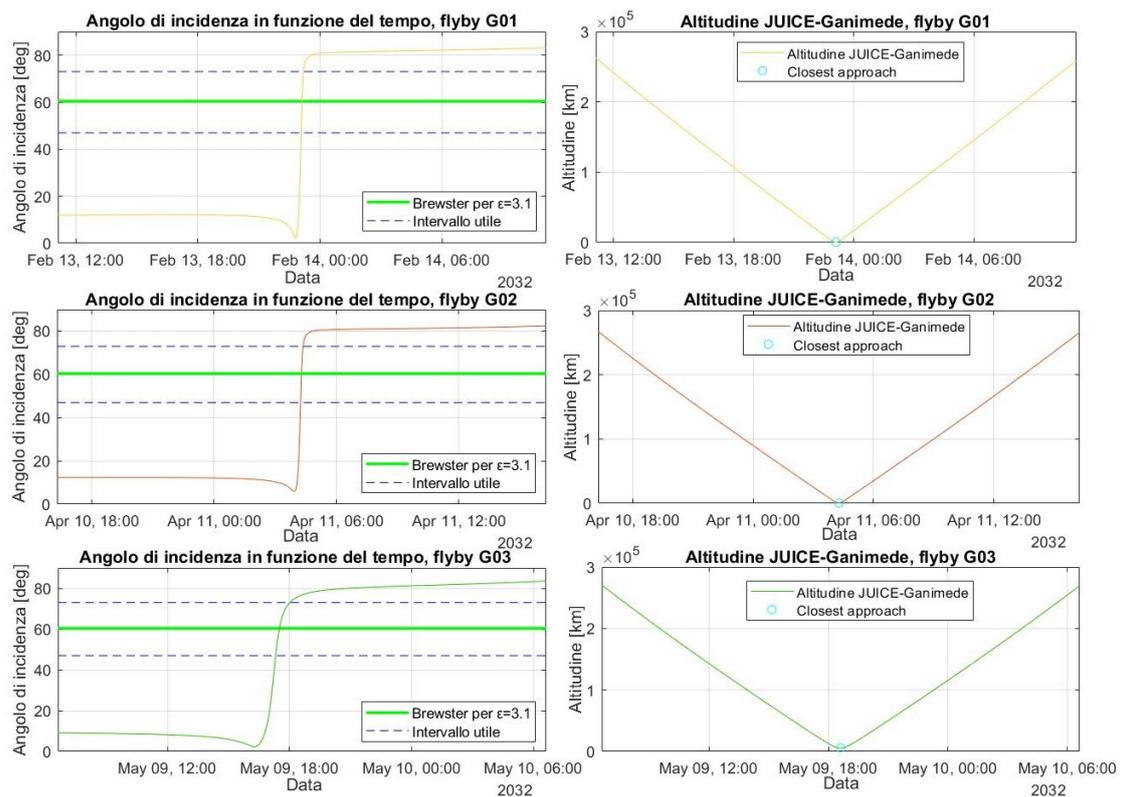


Figura 6.3: Grafici riferiti ai primi tre flyby di JUICE su Ganymede. Ragionando per colonne, la prima rappresenta gli angoli di incidenza relativi ai rispettivi flyby, mentre la seconda riporta l'altitudine tra la sonda e Ganymede. Sono evidenziati i closest approach (cerchio azzurro).

6.2 Flyby G04, G05 e G07

Come per i primi tre flyby, anche G04, G05 e G07 sono stati raggruppati per essere analizzati insieme. In questo caso il criterio comune al quale si è fatto riferimento è la presenza di occultazione.

Osservando la traccia a terra dei tre flyby (Fig. 6.4) si può notare immediatamente la presenza di discontinuità che coincidono con la non esistenza del punto speculare. Dalla studio della teoria si è a conoscenza del fatto che il punto speculare è unico e sempre esistente una volta fissate le posizioni di Terra, JUICE, Ganimede e la forma della luna, a meno che non si abbia un'occultazione, come in questo caso.

Importante notare come il flyby G07 risulti essere l'unico in grado di osservare anche zone, seppur limitate, vicine al polo nord di Ganimede. La copertura superficiale degli altri due, invece, rimane confinata nella fascia equatoriale.

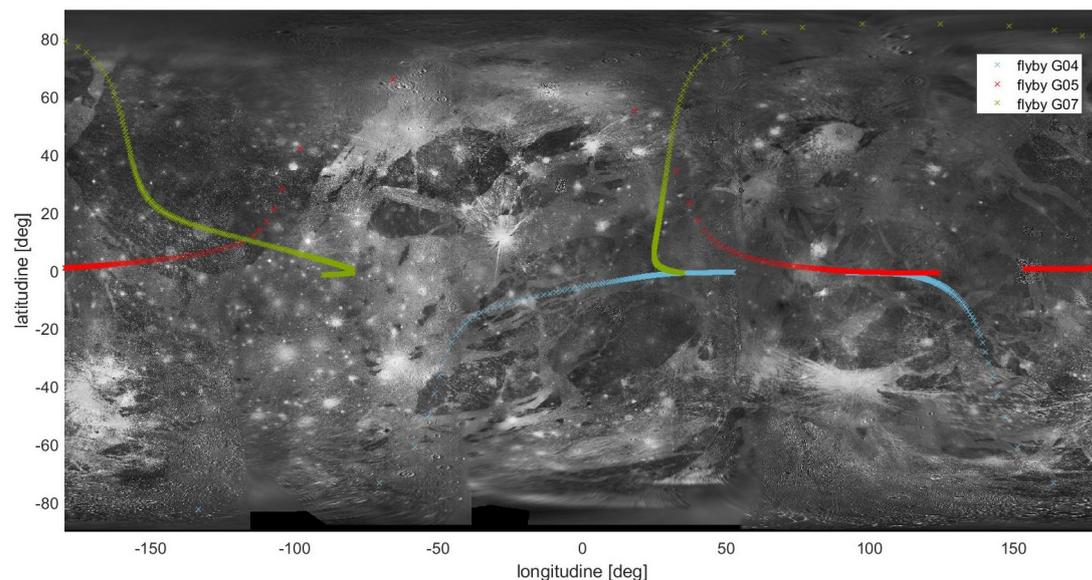


Figura 6.4: Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno dei flyby G04, G05 e G07

L'andamento degli angoli di incidenza è mostrato nelle figure 6.5, 6.6 e 6.7.

La finestra di tempo in cui non si può trovare il punto speculare è una finestra che inizia e finisce con l'angolo di incidenza che arriva a 90° . Lo spacecraft passa dietro il pianeta e questo impedisce la comunicazione col ricevitore (Terra).

Nell'analisi di questi flyby, è stata utile l'implementazione di un algoritmo che calcolasse per ognuno di essi, il periodo di inizio e fine occultazione riportati in tabella 6.1 e questo è stato possibile tramite un'apposita funzione del toolkit SPI-CE: `gfoflt`.

Chiaramente l'occultazione è una finestra dove la possibilità di fare osservazioni è negata e per questo all'interno dei grafici dell'angolo di incidenza è stato riportato, con 2 righe verticali di colore giallo, l'intervallo di tempo rappresentante la durata dell'occultazione.

FLYBY	DATA DI INIZIO OCCULTAZIONE	DATA DI FINE OCCULTAZIONE
G04	02/06/2032 21:36:58	02/06/2032 21:56:58
G05	27/11/2033 06:09:34	27/11/2033 06:31:50
G07	06/06/2032 04:38:50	06/06/2032 05:46:23

Tabella 6.1: Tabella riassuntiva dei flyby con occultazione. Viene riportato l'ID del flyby con rispettivo intervallo di tempo dell'occultazione. Si nota come, rispetto alla durata totale del flyby, le occultazione sono presenti solo per un breve periodo.

Procedendo analogamente all'analisi precedente, qui di seguito sono riportati i grafici dell'angolo di incidenza e dell'altitudine JUICE-Ganimede ottenuti nelle tre diverse finestre temporali.

Quello che si evince sulla base del solo criterio a cui si è fatto riferimento fino ad ora, ovvero la vicinanza dell'angolo di incidenza all'intorno dell'angolo di Brewster, è che tutti e tre i flyby analizzati si comportano in maniera diversa.

Il primo, G04, risulta avere una finestra plausibile durante il bistatic egress¹ fino la fine del flyby. (Fig. 6.5)

Il G05, al contrario, ha una possibilità in bistatic ingress ma da dopo il closest approach, fino alla fine del flyby notiamo che gli intervalli degli angoli ottenuti non rientrano più all'interno del range utile mostrato. (Vedi Fig. 6.6)

Infine, osservando il flyby G07, si osserva chiaramente come gli angoli di incidenza ottenuti con l'implementazione della sua geometria, non risultino assolutamente utili per poter essere sfruttati per fare esperimenti bistatici. (Fig. 6.7)

¹Termine tecnico per indicare l'intervallo dopo il closest approach utile per le osservazioni bistatiche. Al contrario, il periodo antecedente, viene chiamato bistatic ingress.

6.2. Flyby G04, G05 e G07

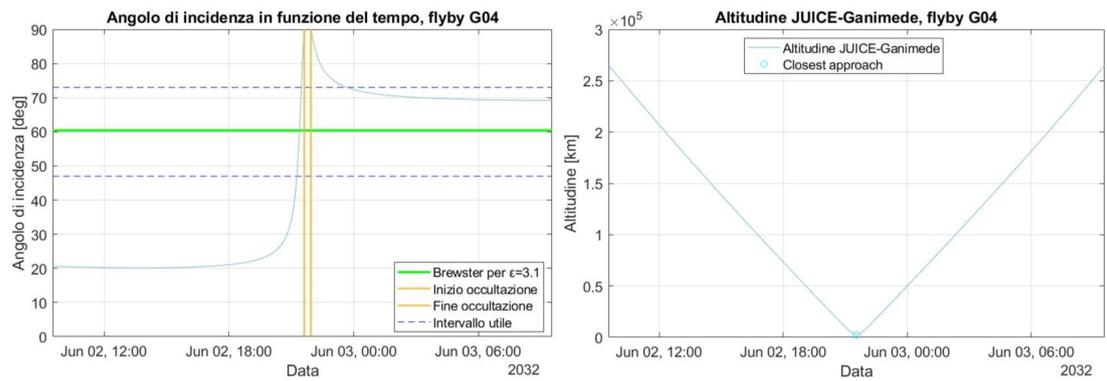


Figura 6.5: Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G04.

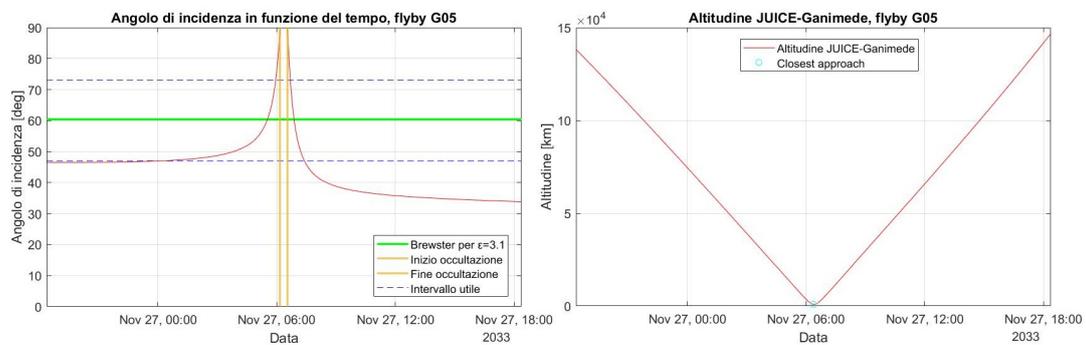


Figura 6.6: Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G05.

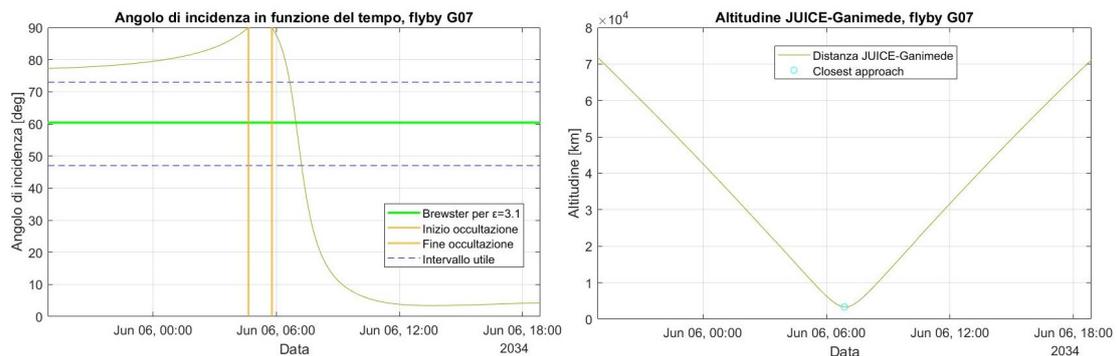


Figura 6.7: Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G07.

6.3 Flyby G06

Il flyby G06 è privo di occultazione e può per questo essere confrontato con quelli già descritti nella sezione 6.1. La traccia a terra è molto simile, in quanto la copertura ottenuta in termini di longitudine e latitudine è molto ristretta e limitata alla fascia equatoriale, senza alcuna possibilità di osservazione dei poli.

A differenza di quello che succede nei primi tre flyby, dove la possibilità di effettuare osservazioni era negata, in G06, come si nota dalla figura 6.9, in bistatic egress si apre la possibilità di fare osservazioni fino alla fine del flyby in quanto l'angolo di incidenza ha dei valori nell'intorno dell'angolo di Brewster calcolato per $\epsilon = 3.1$. Questo è vero soprattutto verso la fine del flyby dove la distanza tra l'ottimo e gli angoli ottenuti risulta minima.

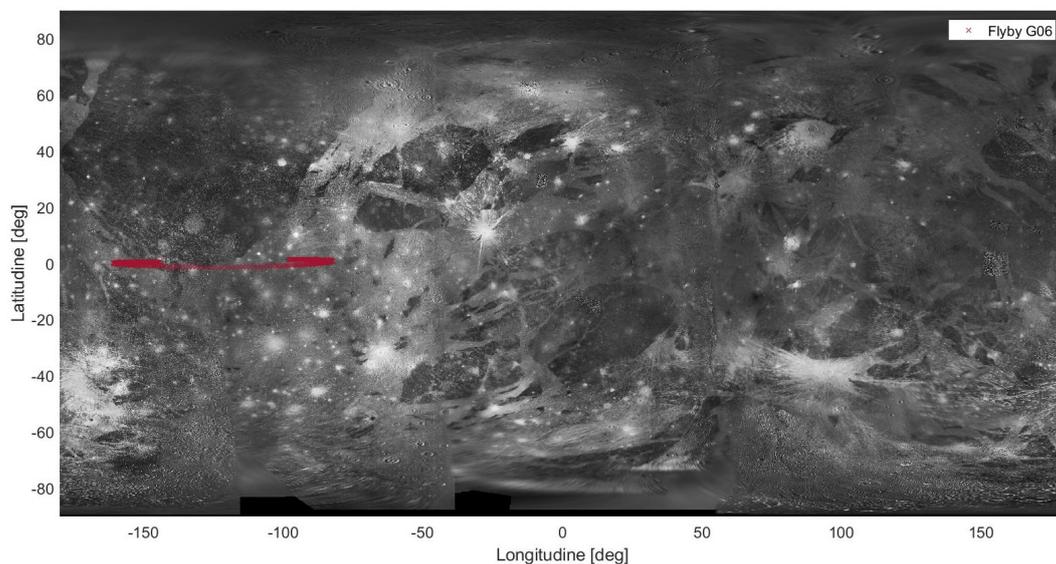


Figura 6.8: Traccia a terra dei punti speculari ottenuti nell'intorno del flyby G06.

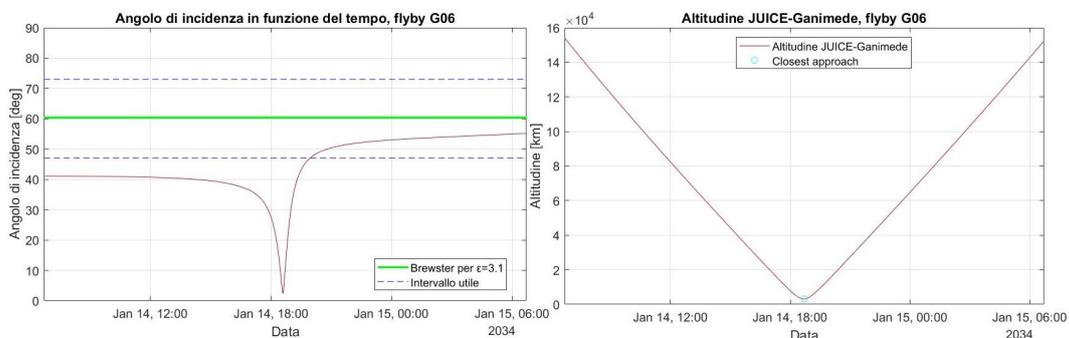


Figura 6.9: Grafico comparativo di angolo di incidenza in funzione del tempo e dell'altitudine JUICE-Ganimede durante il flyby G06.

Capitolo 7

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro era quello di affrontare uno degli aspetti riguardanti l'esperimento di radar bistatico, ovvero la geometria, cercando di comprenderne i principi di base, e quindi applicarli all'analisi della fattibilità di osservazioni bistatiche durante i passaggi ravvicinati di Ganimede da parte della sonda JUICE. Si sono poi aggiunte considerazioni sull'effetto che l'angolo di incidenza ha sull'accuratezza delle possibili stime di costante dielettrica superficiale. Quest'ultimo è stato il criterio fondamentale per capire se vi era o meno possibilità di osservazione bistatica.

Quello che si è estrapolato dall'analisi è che la traiettoria prevista per JUICE rende Ganimede un bersaglio particolarmente difficile per poter effettuare questo tipo di osservazioni, in quanto si è notato che per la gran parte dei flyby analizzati si hanno degli angoli di incidenza non coerenti con quelli ottenuti a partire da considerazioni sull'angolo di Brewster calcolato per ghiaccio d'acqua ($\epsilon = 3.1$). I flyby validi sono il G05 in ingress e il G04 e G06 in egress, pur garantendo una copertura esclusivamente equatoriale. I primi tre flyby, tutti senza occultazione, e il settimo, con occultazione, non offrono opportunità di osservazione. Inoltre il flyby G07, nonostante sia l'unico ad offrire una copertura superficiale parziale del polo nord, ai fini del nostro studio risulta non adeguato.

È doveroso ricordare che durante l'indagine sono state fatte importanti semplificazioni e sono stati trascurati molti fenomeni come ad esempio il tempo luce, la forma ellissoidale di Ganimede assunto per semplicità sferico e il puntamento delle antenne della sonda presente ad oggi nei kernel di missione. Questa analisi, infatti, voleva essere una valutazione esclusivamente geometrica di fattibilità, non dipendente dal reale puntamento di JUICE. Nel caso in cui la sonda dovesse essere puntata in una direzione diversa da quella del punto speculare per completare altri obiettivi scientifici di più alta priorità, flyby geometricamente validi come il G06, non potrebbero essere sfruttati per osservazioni bistatiche di Ganimede.

Lavori futuri potranno riprendere la logica di questa analisi e applicarla alla parte finale della missione per estendere l'indagine sulle opportunità anche alla Ganymede Orbital Phase.

Bibliografia

- [1] European Space Agency. *Jupiter ICy moons Explorer. Exploring the emergence of habitable worlds around gas giants*. Settembre 2014.
- [2] The European Space Agency. Juice spice kernels set, 2022. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/spice/spice-for-juice>.
- [3] The European Space Agency. Juice:jupiter icy moons explorer, 2022. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice.
- [4] The European Space Agency. The moons of jupiter: What will juice discover?, 2022. URL: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice/The_moons_of_Jupiter_What_will_Juice_discover.
- [5] The European Space Agency. Timeline after launch, 2022. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/juice/timeline>.
- [6] K.C. Bender, J.W. Rice, D.E. Wilhelms, and R Greeley. Geological map of callisto. *USGS Misc. Investigations Series, I-2581*, 1997.
- [7] L Bruzzone, G Alberti, C Catallo, A Ferro, W Kofman, and R Orosei. Sondaggio radar nel sottosuolo della luna gioviana ganimede. *Atti dell'IEEE*, 99.
- [8] G.H.A. Cole and M.M. Woolfson. Planetary science: The science of planets around stars. page 68, 2002.
- [9] M.E. Davis. *Advances in bistatic radar*, volume 2. SciTech Publishing, 2007.
- [10] NASA's Science Mission Directorate. Jupiter in depth, 2019. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/juice/in-depth/>.
- [11] NASA's Science Mission Directorate. Jupiter moons, 2019. URL: <https://solarsystem.nasa.gov/moons/jupiter-moons/in-depth/>.
- [12] E Ecale, F Torelli, and I Tanco. Juice interplanetary operations design: drivers and challenges. In *2018 SpaceOps Conference*, page 2493, 2018.

-
- [13] P.D. Feldman, McGrath, A Melissa, and et al Strobell, D.F. Hst/stis ultraviolet imaging of polar aurora on ganymede, 2000, Giugno. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...535.1085F/abstract>.
- [14] O Grasset, M.K Dougherty, A Coustenis, E.J Bunce, C Erd, D Titov, M Blanc, A Coates, P Drossart, L.N Fletcher, et al. Jupiter icy moons explorer (juice): An esa mission to orbit ganymede and to characterise the jupiter system. *Planetary and Space Science*, 78:1–21, 2013.
- [15] A.P. Ingersoll, T.E. Dowling, A.P. Gierasch, P.J. and Showman, and et al. *Dynamics of Jupiter's Atmosphere*. 1997.
- [16] California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory. The navigation and ancillary information facility, 2022. URL: https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/C/req/index.html.
- [17] NASA Jet Propulsion Laboratory. Hubble finds thin oxygen atmosphere on ganymede, Ottobre, 1996. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/galileo/hst7.html>.
- [18] E Kersten, A.E Zubarev, T Roatsch, and K-D Matz. Controlled global ganymede mosaic from voyager and galileo images. *Planetary and Space Science*, 206:105310, 2021.
- [19] V.G. Kunde. Jupiter's atmospheric composition from the cassini thermal infrared spectroscopy experiment. *In Science*, 305(7695):1582–86, 2004.
- [20] N Ligier, C Paranicas, J Carter, F Poulet, W.M. Calvin, T.A. Nordheim, C Snodgrass, and L Ferellec. Surface composition and properties of ganymede: Updates from ground-based observations with the near-infrared imaging spectrometer sinfoni/vlt/eso. *Icarus*, 333:496–515, 2019.
- [21] J.I. Lunine. Ocean worlds exploration. *Acta Astronautica*, 131:123–130, 2017.
- [22] NASA/JPL/DLR. Pia01299: The galilean satellites. URL: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01299>.
- [23] W Petterson, J.W. Head, and G.C. Collins. A global geologic map of ganymede. *Lunar and Planetary Science*, 2007.
- [24] P.H. Phipps and P Withers. Radio occultations of the io plasma torus by juno are feasible. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2):1731–1750, 2017.

- [25] L Roth, N Ivchenko, G.R. Gladstone, J Saur, D Grodent, B Bonfond, P.M. Molyneux, and K.D. Retherford. Evidence for a sublimated water atmosphere on ganymede from hubble space telescope observations. *arXiv*, 2106, 2021.
- [26] R.A. Simpson. Spacecraft studies of planetary surfaces using bistatic radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(2):465–482, 1993.
- [27] R.A. Simpson and G.L. Tyler. Viking bistatic radar experiment: Summary of first-order results emphasizing north polar data. *Icarus*, 46(3):361–389, 1981.
- [28] R.A. Simpson, G.L. Tyler, M Pätzold, B. Häusler, S.W. Asmar, and A.K. Sultan-Salem. Polarization in bistatic radar probing of planetary surfaces: Application to mars express data. *Proceedings of the IEEE*, 99(5):858–874, 2011.
- [29] F Ulaby, D Long, W Blackwell, C Elachi, A Fung, C Ruf, K Sarabandi, J Zyl, and H Zebker. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. 01 2014.
- [30] A Zubarev, I Nadezhdina, J Oberst, H Hussmann, and A Stark. New ganymede control point network and global shape model. *Planetary and Space Science*, 117:246–249, 2015.