

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
**INGEGNERIA AEROSPAZIALE**  
Classe L-9

**ELABORATO FINALE DI LAUREA**  
In Satelliti e Missioni Spaziali

**Studio e modellizzazione delle accelerazioni non gravitazionali  
di Cassini causate dai getti dei geysers di Encelado**

CANDIDATO  
Virginia Angelini

RELATORE  
Paolo Tortora

CORRELATORE  
Marco Zannoni

Anno Accademico 2016/2017



*A l'alta fantasia qui mancò possa;  
ma già volgeva il mio disio e 'l velle,  
sì come rota ch'igualmente è mossa,  
l'amor che move il sole e l'altre stelle.*

DANTE ALIGHIERI



# Introduzione

In ambito spaziale ogni missione di esplorazione è studiata nei minimi dettagli: dal peso allo spessore dei componenti del velivolo spaziale, dalle temperature alle quali può sopravvivere e a cui è sottoposto alla quantità di propellente necessaria alle manovre orbitali richieste. Niente è lasciato al caso, dato che il successo della missione stessa dipende dalla capacità dei progettisti di prevedere fin nei minimi dettagli il comportamento dei sottosistemi, una volta in orbita.

E' dall'adeguato puntamento degli strumenti di bordo e dal corretto moto della sonda lungo la sua orbita che dipende la realizzazione dell'obiettivo: se l'assetto della sonda e la traiettoria dovessero essere sbagliati rispetto alle previsioni, probabilmente non sarebbe possibile raccogliere i dati richiesti. Ogni fattore esterno che quindi potrebbe perturbare il moto della sonda deve essere conosciuto e studiato nel dettaglio in modo da poter contrastarne l'effetto se indesiderato.

La sonda Cassini si è dedicata allo studio del sistema di Saturno per quasi vent'anni e durante l'osservazione di Encelado, un satellite naturale ghiacciato di Saturno, si è potuta notare una intensa attività criovulcanica nella regione polare sud. Nonostante le sue piccole dimensioni, infatti Encelado è geologicamente attivo (l'unico corpo del Sistema Solare oltre alla Terra ed Io, una luna di Giove) e presenta delle fratture sulla superficie dalle quali

vengono eruttati potenti getti di vapore e grani di ghiaccio che raggiungono svariati chilometri di altezza. Quando Cassini transita in questa zona, non vi è il vuoto quindi è sottoposto a una resistenza aerodinamica che ne modifica la velocità. Comprendere come i geysers di Encelado possano influenzare il moto della sonda è fondamentale in modo da poter utilizzare opportunamente il sistema di controllo di assetto e per mantenere l'orbita corretta, ma anche per tenerne conto nel progetto di missioni future.

In questo elaborato viene descritta l'implementazione di due modelli per il calcolo della densità del materiale emesso dai geysers. Tali modelli sono stati utilizzati per calcolare la resistenza atmosferica (*drag*) e quindi la perturbazione sulla velocità (il  $\Delta V$  orbitale) a cui è sottoposta Cassini durante due diversi flyby: E9 ed E19 (secondo la numerazione progressiva attribuita dal Cassini *Mission Plan*). Si sono scelti proprio questi due particolari flyby perché è disponibile in letteratura una stima indipendente della  $\Delta V$ , ottenuta tramite fit orbitale dei dati doppler, riportata nell'articolo "The gravity field and interior structure of Enceladus" (*Iess et al*, Science, 2014). Assunto questo documento come riferimento, si è valutata la compatibilità tra i valori ottenuti coi modelli analizzati e quelli di Iess et al. in modo da valutare la correttezza del lavoro svolto.

Nel primo capitolo viene descritta l'incredibile rarità rappresentata dai geysers di Encelado e le principali teorie che ne spiegano la fenomenologia.

Il secondo capitolo è dedicato alla Sonda Cassini e alle principali caratteristiche dell'esplorazione del satellite.

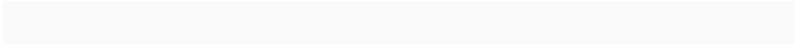
Il terzo capitolo si sofferma invece sulla modellizzazione della densità necessaria al calcolo della resistenza aerodinamica. Vengono descritti due modelli in modo da poter avere dei risultati che possano essere confrontati.

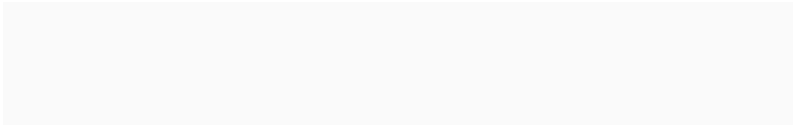
Una volta calcolata la densità, nel quarto capitolo ci si occupa

della resistenza aerodinamica.

Nel quinto capitolo viene descritta l'analisi di sensitività e il metodo Monte Carlo, coi quali è stato possibile valutare in modo approssimato l'incertezza associata ai modelli.

Nel sesto capitolo è riportata la procedura di calcolo dei  $\Delta V$  e delle probabilità di compatibilità tra i valori ottenuti coi modelli e quelli di riferimento. I  $\Delta V$  sono poi confrontati nei vari flyby, tenendo conto delle incertezze associate.







# Indice

Introduzione .....	5
Indice .....	9
1. Encelado .....	11
1.1 Caratteristiche.....	11
1.2 La regione polare sud .....	13
1.3 Criovulcanismo .....	14
1.4 Anomalie termiche e trasferimento di calore alla superficie .....	18
1.5 Le cause dell'attività geologica di Encelado .....	20
2. La sonda Cassini.....	22
2.1 La missione Cassini-Huygens .....	23
2.2 Cassini e l'esplorazione di Encelado .....	24
3. Modelli di densità.....	28
3.1 Modello n.1 (Sarani 2010).....	29
3.2 Modello n.2 (Lee 2013).....	38

4. Drag .....	46
5. Analisi dell'incertezza dei modelli .....	50
5.1 Analisi di sensitività .....	50
5.1.2 Analisi di sensitività dei parametri del modello n.1 .	52
5.1.2.1 Analisi di sensitività di $C$ .....	52
5.1.2.2 Analisi di sensitività di $\varepsilon$ .....	53
5.1.2.3 Analisi di sensitività di $z_0$ .....	55
5.1.3 Analisi di sensitività dei parametri del modello n.2 .	56
5.1.3.1 Analisi di sensitività di $k\rho$ .....	56
5.1.3.2 Analisi di sensitività di $k\theta$ .....	57
5.2 Metodo Monte Carlo .....	59
6. $\Delta V$ .....	67
Conclusioni.....	73
Bibliografia e Sitografia .....	75
Ringraziamenti .....	81

# Capitolo 1

## Encelado

### 1.1 Caratteristiche

Encelado è un satellite naturale di Saturno ed ha un raggio medio di circa 252 km. Più precisamente, ha la forma di un ellissoide con semiasse maggiore, medio e minore rispettivamente di 256.6 km, 251.4 km e 248.3 km. Ha dimensioni piuttosto modeste, infatti la sua area di disco non è più grande della Gran Bretagna (*figura 1.1*).

A causa della grande brillantezza di Saturno, Encelado fu scoperto soltanto nel 1789, quando William Herschel lo notò in un momento in cui gli anelli di Saturno erano di taglio, ovvero quando il nostro pianeta è all'interno del piano degli anelli durante l'equinozio del pianeta gassoso, e quindi ne permettevano la visualizzazione dalla Terra. Encelado infatti orbita nella regione più densa dell'anello E di Saturno, un disco di materiale ghiacciato e polveri costituito da particelle microscopiche che si estende dall'orbita di Mimas fino all'orbita di Rhea, altri due piccoli satelliti di Saturno. Con le i dati della sonda Cassini è stato confermato che sia proprio Encelado la fonte principale dei materiali dell'anello.

La sua distanza media da Saturno è di 238 020 km e l'orbita ha una inclinazione approssimativamente nulla rispetto al piano dell'eclittica, mentre l'eccentricità di 0.0047 è mantenuta costante grazie alla risonanza orbitale 2:1 con Dione. Durante l'orbita, compresa tra quelle di Mimas e Teti, la distanza Encelado-Saturno è di 239.18 migliaia di chilometri al pericentro mentre all'apocentro la distanza arriva a 236.89 migliaia di chilometri.

Encelado è uno dei corpi più brillanti del sistema solare con un albedo di 0.99, infatti la sua superficie ghiacciata riesce a riflettere la maggior parte della luce proveniente dal Sole nello spazio.

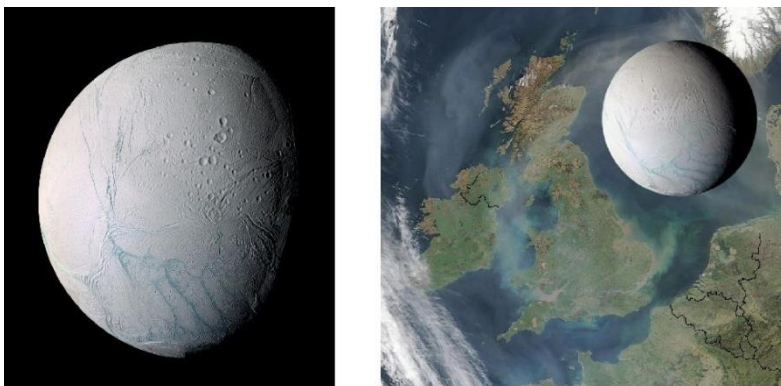


Fig 1.1 A sinistra Encelado in falsi colori, a destra confronto delle dimensioni di Encelado con la Gran Bretagna

Le osservazioni effettuate dalla sonda Cassini hanno permesso di visualizzare la superficie ghiacciata di Encelado che presenta zone ricche di crateri da impatto, tipici di corpi senza una densa atmosfera che possa erodere i meteoriti prima che giungano a terra, ma anche regioni più lisce e piane, quindi di creazione più recente, che fanno pensare che Encelado sia un pianeta geologicamente attivo.

## 1.2 La regione polare sud

La regione polare sud è quella che maggiormente ha attratto l'attenzione di scienziati, fisici e astrobiologi. Circondata da prominenti catene montuose con centinaia di rilievi sintomo di forte attività tettoniche nel passato, è coperta da fratture, creste e scanalature nidificate ma pochi crateri, il che suggerisce che possa essere la regione più giovane di tutta la luna con una età compresa tra 10 e 100 milioni di anni. Sono state individuate enormi fratture denominate *tiger stripes* che si estendono da 65° sud fino al polo sud. Sono depressioni lineari di 0.3 km di profondità, 135 km di lunghezza, 2 km di larghezza e distanti tra loro 35 km che si differenziano dalle altre di dimensioni molto più ridotte che forse rappresentano resti di stripes antiche. Sono cosparse da grani di ghiaccio di diametro maggiore rispetto a quelli che, provenienti dall'anello E, ricoprono il resto della superficie (10-100  $\mu\text{m}$ ) e da composti organici semplici. La posizione di queste grandi fratture potrebbe essere spiegata da una delle seguenti due teorie. La prima afferma che la velocità di rotazione del satellite potrebbe essere aumentata a causa di uno spostamento dell'orbita verso l'interno provocando un appiattimento lungo il proprio asse, tuttavia le fratture in questo caso dovrebbero presentarsi anche al polo nord. La mancanza di simmetria della presenza di fratture potrebbe essere dovuto a spessori differenti della crosta: più sottile nella regione più giovane a sud e più spesso nella regione antica e ricca di crateri del nord. La seconda teoria sostiene che potrebbe essersi verificato uno spostamento verso l'alto di una massa di materiale caldo e a bassa densità all'interno del satellite, la quale potrebbe aver spostato la regione che si trovava alle latitudini medie verso la regione polare, provocando le fratture.

## 1.3 Criovulcanismo

Dati provenienti dalla sonda Cassini hanno permesso di rilevare fenomeni di criovulcanismo, ossia di attività vulcanica collegati all'eruzione di sostanze che subito ghiacciano a causa delle temperature gelide dello spazio. I getti si innalzano dalle principali tiger stripes (*figura 1.2*): Alexandria, Baghdad, Cairo e Damascus e per la maggior parte vengono emessi in un piano perpendicolare alla superficie del satellite, anche se con qualche eccezione. Le eruzioni hanno una forma denominata “a tenda” perché si estendono per chilometri lungo la frattura. Non tutti i getti hanno la stessa intensità o raggiungono le stesse altezze, a causa delle differenze nelle fratture stesse. I getti più forti provengono da Baghdad e Damascus.

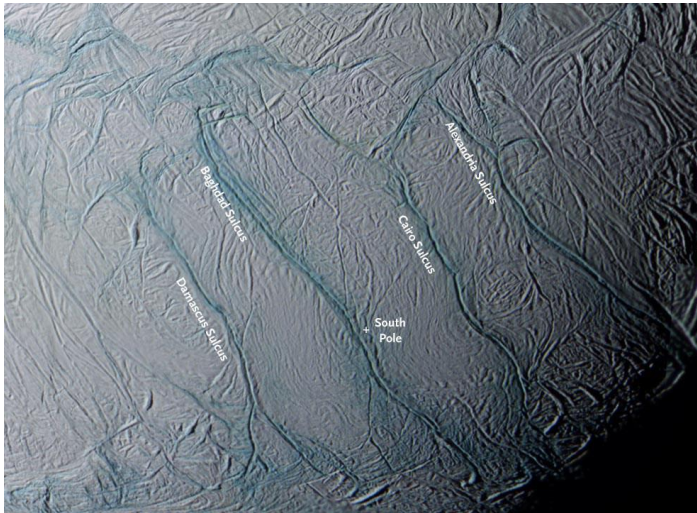


Fig 1.2 Tiger stripes: Alexandria, Baghdad, Cairo, Damascus

Sono stati individuate grazie alle immagini di Cassini circa 100 sorgenti distinte nel polo sud e i materiali eruttati si innalzano per centinaia di chilometri sopra la superficie, fino a una altezza di 300 km, andando a costituire una debole atmosfera (*figura 1.3*). Encelado, a causa delle sue dimensioni ridotte, ha una debole gravità che gli impedisce di trattenerla, quindi deve esserci una fonte che rifornisce continuamente i gas che lo circondano. Per questa ragione e perché la densità dell'atmosfera diminuisce drasticamente allontanandosi dal polo sud, si pensa che la fonte siano proprio i getti che si ergono dalle fratture.

I getti, che si possono considerare simili ai geysir sulla Terra, sono formati da vapore (vengono eruttati circa 200 kg/s di H<sub>2</sub>O) e grani di ghiaccio, ma sono state trovate tracce di azoto, ammoniaca, metano, anidride carbonica ed altre sostanze. L'ammoniaca in particolare potrebbe costituire un anti-freezing, infatti riduce la temperatura di solidificazione dell'acqua fino a 100 K rispetto a quella dell'acqua pura.

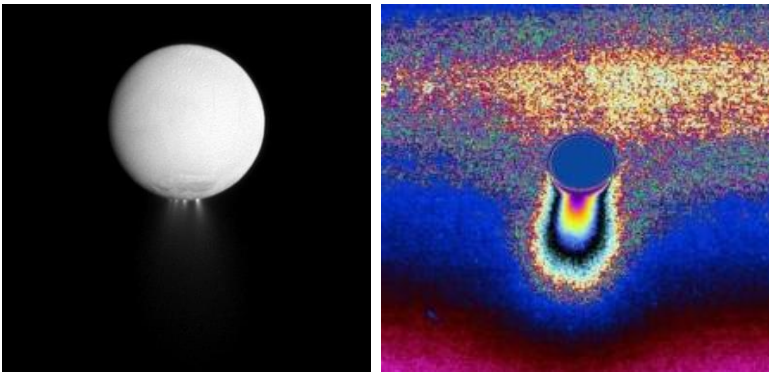


Fig 1.3 Getti provenienti dalla regione sud, a destra altezza relativa dei getti

La velocità delle particelle può arrivare a 300-500 m/s, superando di gran lunga la velocità di fuga di 239 m/s. La velocità osservata è molto maggiore anche della velocità termica, il che significa che all'interno delle fratture lungo la profondità vi è un gradiente di temperatura molto grande tale da avere così un gradiente di pressione grande e una accelerazione delle particelle molto elevata. Tuttavia le continue collisioni dei grani all'interno dei condotti inducono una forza di attrito che riduce la velocità nel momento in cui lasciano l'apertura. Le particelle più leggere riescono a sfuggire alla gravità entrando a far parte dell'anello E, mentre quelle più pesanti ricadono sulla superficie.

Ci sono diverse teorie che spiegano la provenienza dei materiali eruttati dalle tiger stripes. La prima teoria afferma che  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  siano insufficientemente solubili in acqua per essersi originati in una soluzione acquosa e che quindi debbano essere presenti in un'altra fase, come bolle di gas. La solubilità di questi gas in un clatrato idrato (ghiaccio d'acqua con una struttura a gabbia che intrappola altri componenti volatili) è molto maggiore di quella in acqua liquida, quindi si pensa che il serbatoio dei geysers, posizionato sotto la superficie, sia costituito da clatrato. L'acqua e i gas sono poi rilasciati in seguito alla depressurizzazione del clatrato, riescono a risalire il condotto che porta dal serbatoio alla superficie per poi formare pennacchi anche a temperature basse come 140 K.

La seconda sostiene che il ghiaccio in profondità sublimi a causa del calore proveniente dall'interno del satellite più velocemente di quello in superficie creando così i geysers. La temperatura degli sfoghi stimata in questo modello sarebbe circa 180 K.

La terza afferma che sotto la superficie ghiacciata di Encelado, a 30-40 km di profondità, ci sia un oceano profondo 8 km di acqua liquida (quindi a temperatura maggiore di 273 K) che costituisca il serbatoio che alimenta i geysers. Oggi la teoria più accreditata è la



terza, infatti nella regione sud è presente una depressione di 0.5 km che potrebbe essere spiegata con la presenza di una grande massa d'acqua sotto lo spesso strato di ghiaccio. Inoltre il 99% dei getti ha una salinità tra 0.5-2%, valore che si avvicina a quello degli oceani terrestri. L'oceano di acqua avrebbe un fondale roccioso costituito da silicati che spiegherebbe così la salinità: infatti i sali potrebbero essersi formati soltanto dalla diretta solidificazione di acqua salina e non dalla condensazione del vapore. Una misura della quantità di sali negli anelli di Saturno che si è rivelata praticamente nulla, è invece giustificata dal fatto che le particelle che costituiscono gli anelli sono quelle riuscite a sfuggire alla gravità di Encelado, cioè quelle più leggere che non sono costituite da sali.

L'acqua liquida e l'azoto sono ingredienti importanti per la nascita della vita che, trovato un habitat adeguato, potrebbe essersi sviluppata su Encelado.

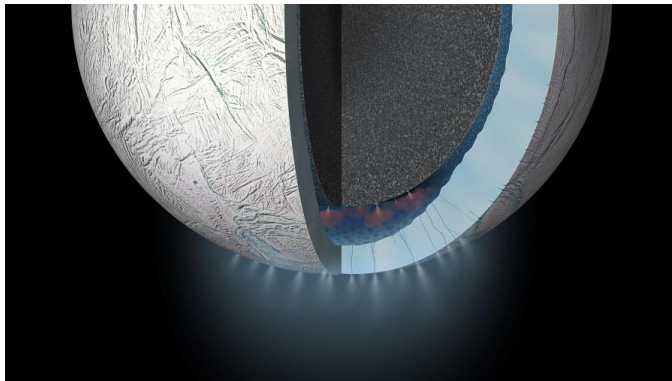


Fig 1.4 Ipotesi della struttura interno di Encelado, con l'oceano di acqua liquida collocato nella regione del polo sud

Non è ancora chiaro però se sotto la superficie sia presente un oceano globale, oppure locale cioè collocato soltanto nella regione del polo sud che spiegherebbe la differenziazione delle emissioni di calore tra nord e sud. La teoria favorita attuale è quella un oceano globale con spessore maggiore al polo sud dove la crosta è più sottile (*figura 1.4*).

## 1.4 Anomalie termiche e trasferimento di calore alla superficie

La superficie di Encelado ha una temperatura di circa 73 K (-200 °C) ed è interamente ghiacciata. Cassini ha però rilevato alcune anomalie termiche, ossia punti caldi (*hot spot*) nella regione polare sud, la cui temperatura di 140-180 K è molto maggiore rispetto a quella del resto della superficie (*figura 1.5*).

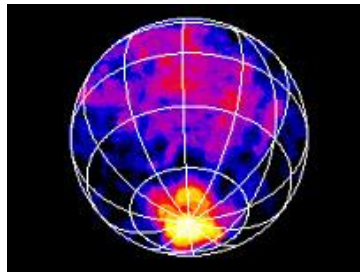


Fig 1.4 Mappa delle emissioni termiche, il colore giallo corrisponde a temperature più elevate

Si stima che l'emissione termica proveniente dai punti caldi sia di 5 GW in totale, una quantità elevata di calore atipica per un corpo

piccolo e così distante dal Sole come Encelado. Studi basati su dati raccolti dalla Sonda Cassini, hanno permesso di trovare una relazione tra i geysers e i punti caldi, verificando che entrambi si collocano nelle tiger stripes (figura 1.6).

Il calore potrebbe essere trasferito dalla sorgente alla superficie mediante conduzione attraverso il ghiaccio, attraverso i gas come calore latente oppure da un flusso di acqua liquida. L'acqua liquida tuttavia dovrebbe trovarsi molto vicina alla superficie per mantenere la temperatura osservata dalle strumentazioni di Cassini.

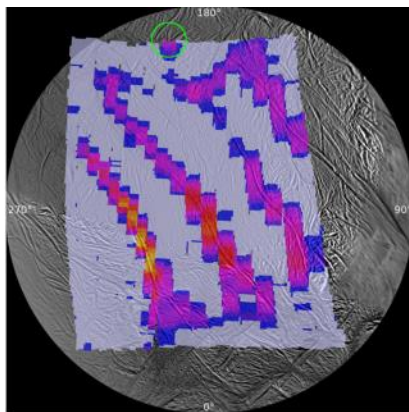


Fig 1.5 Mappa delle emissioni termiche delle tiger stripes: le regioni più fredde sono quelle blu pallido, poi si procede verso le più calde rosse e infine gialle

Allora potrebbe essere il vapore a trasferire il calore, infatti fratture verticali corrono lungo le tiger stripes e il vapore che vi scorre attraverso trasmetterebbe il calore alle pareti. Tuttavia la perdita di calore porterebbe il vapore a condensare, rischiando così di ostruire le aperture.

## 1.5 Le cause dell'attività geologica di

### Encelado

Encelado risulta essere un corpo molto attivo dal punto di vista geologico, ma fenomeni simili risultano essere piuttosto rari al di fuori del nostro pianeta. Perché quindi sono stati osservati proprio in un satellite di Saturno? Quali sono le cause?

Che sia presente un oceano al di sotto della superficie è una teoria molto plausibile, tuttavia il fatto che non si sia ghiacciato implica la presenza di una fonte di calore, infatti la regione sud risulta essere la più calda (*figura 1.5*). Lo sviluppo di una tale quantità di calore potrebbe essere dovuta agli stress mareali: Encelado durante la sua orbita, si trova ad essere a una distanza da Saturno che varia nel tempo e di conseguenza varia anche la forza di attrazione gravitazionale tra i due corpi celesti. Saturno, che è molto più massivo di Encelado, lo attrae in modo differenziato e lo sottopone a trazione e compressione, modificandone la forma ma mantenendone costante il volume. In questo modo grandi masse all'interno di Encelado sono sottoposte a sforzi che fanno sì che per attrito si riscaldino. Tuttavia il calore sviluppato in questo modo non sarebbe sufficiente a mantenere l'acqua allo stato liquido, perciò si pensa che sia il decadimento radioattivo del core di silicati che compensi la perdita di calore nello spazio.

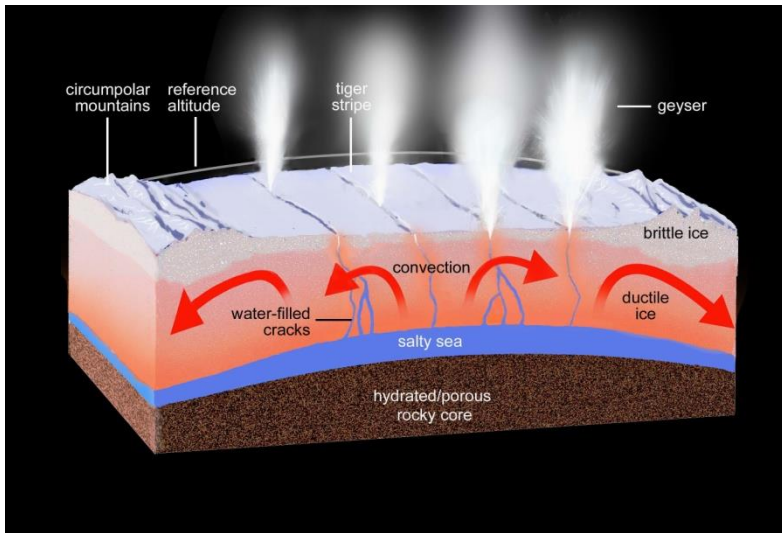


Fig 1.6 Modello della struttura interna al di sotto delle tiger stripes

Le maree sarebbero la causa anche delle variazioni temporali osservate nell'attività dei geysers: le fratture, sottoposte alle forze mareali, si aprono e si chiudono determinando variazioni nelle emissioni dei getti, che tuttavia rimangono sempre attivi, soltanto in casi molto rari si bloccano. Si è osservato che la brillantezza dei getti è maggiore quando Encelado si avvicina all'apocentro della sua orbita rispetto a quando è al pericentro, quindi viene eruttato più materiale quando il satellite si trova lontano da Saturno, cioè mentre le tiger stripes sono sottoposte a tensione più elevata. Nonostante la brillantezza possa variare anche in base all'angolo di fase (l'angolo tra la luce incidente ai getti e quella riflessa dai getti che giunge allo strumento che deve effettuare le fotografie), si è potuto osservare che fosse comunque molto più accentuata in prossimità dell'apocentro anche ad angoli di fase differenti, suggerendo un ruolo importante delle forze mareali nel controllo dell'attività geologica.

Quando una frattura si apre l'esposizione dell'acqua al vuoto fa sì che evaporino e che il ghiaccio sublimi formando così un geysir.

La presenza di un core di silicati riduce l'ampiezza della deformazione mareale e produce un flusso di calore minore, ma la presenza di un oceano globale che disaccoppia il guscio di ghiaccio dall'interno roccioso aumenta notevolmente la produzione di calore dovuta alle maree. La fase dell'eruzione può essere alterata a causa di effetti dissipativi nelle faglie, di processi dinamici all'interno dell'oceano oppure a causa della reazione dello strato di ghiaccio alle maree dovuta alla sua proprietà viscoelastica.

Un cambiamento nell'attività di Encelado potrebbe manifestarsi nel caso la sua orbita si modificasse, in questo modo si avrebbero sforzi mareali differenti e quindi anche un tipo di attività geologica differente. Le maree tenderebbero a modificare l'eccentricità, tuttavia la risonanza con Dione fa sì che si mantenga costante, quindi c'è equilibrio.

## Capitolo 2

### La Sonda Cassini

#### 2.1 La missione Cassini-Huygens

La sonda Cassini (figura 2.1) è il velivolo spaziale più sofisticato e all'avanguardia mai inviato ad esplorare un pianeta del Sistema Solare esterno. Cassini, insieme al lander Huygens, fa parte della missione Cassini-Huygens frutto di una collaborazione tra NASA, ESA e ASI, volta all'esplorazione di Saturno e i suoi satelliti.

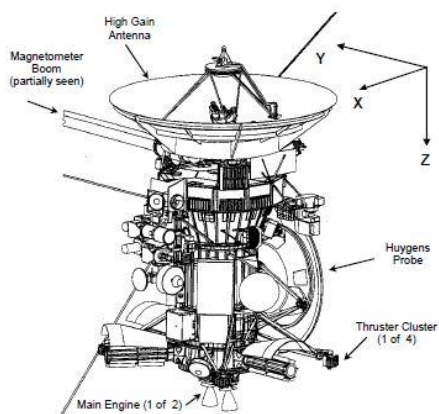


Fig 2.1 Componenti principali della sonda Cassini

Conosciuto fin dai tempi più antichi perché visibile ad occhio nudo, Saturno è il secondo pianeta più grande del Sistema Solare e il suo sistema è uno dei più interessanti conosciuti. E' composto da:

- Saturno stesso, con la sua atmosfera, campo gravitazionale e campo magnetico;
- Titano, la luna più grande di Saturno;
- I satelliti ghiacciati, tra i quali Encelado, Dione e Rhea sono i più importanti;
- Il sistema di anelli, il più esteso del Sistema Solare;
- La magnetosfera di Saturno.

La missione Cassini si occupa dello studio dei vari elementi e delle loro interazioni.

Lanciata il 15 ottobre 1997, Cassini raggiunse Saturno il 1 luglio 2004 dopo un viaggio lungo 7 anni comprendente flybys con Terra, Venere e Giove. Iniziò a inviare verso Terra dati e immagini sorprendenti, grazie ai quali la conoscenza del sistema di Saturno è incrementata notevolmente.

## 2.2 Cassini e l'esplorazione di Encelado

Il successo della missione Cassini è dovuto a un sofisticato equipaggiamento composto dagli strumenti più all'avanguardia mai inviati nel Sistema Solare esterno. La fonte di energia che permette alla strumentazione di Cassini di funzionare sono tre generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG) che sfruttano il decadimento del plutonio per ottenere energia elettrica; i pannelli solari sono difficilmente utilizzabili in missioni così lontane dal Sole perché per generare sufficiente potenza dovrebbero essere molto estesi e pesanti.



Grazie ai numerosi flyby, Cassini ha avuto incontri ravvicinati con Encelado (figura 2.2) che gli hanno permesso di individuare e fotografare l'attività criovulcanica nella regione del polo sud e studiarne i fenomeni.

Gli strumenti utilizzati sono stati:

- ISS (Imaging Science Subsystem): cattura immagini in luce visibile, infrarossi e ultravioletti. Ha osservato la luminosità delle particelle solide dei getti, la molteplicità delle sorgenti e la loro posizione sulla superficie.
- CIRS (Composite Infrared Spectrometer): misura la radiazione infrarossa per analizzare la temperatura e le proprietà termiche. Ha osservato le anomalie termiche del polo sud.
- UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrometer): cattura immagini nelle lunghezze d'onda dell'ultravioletto. È stato utilizzato per indagare sulla struttura e la velocità dei getti.
- CDA (Cosmic Dust Analyzer): misura dimensioni, velocità, composizione dei grani di polvere che orbitano intorno a Saturno. È stato utilizzato per analizzare le particelle dell'anello E, provenienti da Encelado.
- VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer) : misura la radiazione emessa ed assorbita da atmosfera e superficie. Ha analizzato gli spettri dei getti distinguendo tra le particelle che precipitano a terra e quelle che fanno parte dell'anello E.
- MAG (Magnetometer) e CAPS (Cassini Plasma Spectrometer): analizzano il campo magnetico determinandone intensità e direzione. Hanno rilevato

l'impronta magnetica della deflessione della magnetosfera di plasma intorno ad Encelado. La sorgente della perturbazione è stata individuata al polo sud, quindi è collegata ai getti.



Fig 2.2 Ricostruzione artistica di Cassini in vicinanza ad Encelado

Durante i flyby con Encelado Cassini ha attivato il sistema di controllo di assetto per contrastare il disturbo dato dal passaggio della sonda tra i getti eruttati dalle tiger stripes. Infatti l'incontro della sonda con vapori d'acqua e altre sostanze determina la nascita di una resistenza aerodinamica (*drag*) che potrebbe allontanare la sonda dall'orbita prevista, modificarne la velocità e l'assetto, rendendo impossibile il puntamento di alcune strumentazioni.

Il sistema di controllo di assetto di Cassini (AACS) determina e controlla l'assetto della sonda, risponde a specifiche richieste di puntamento di strumentazioni scientifiche o antenne inviate dalle ground stations e ne varia la velocità se richiesto. Per mantenere

un assetto stabile durante la missione sono utilizzati due diversi sistemi di controllo: propulsori e ruote di reazione. I propulsori, in genere a monopropellente (idrazina), vengono utilizzati soprattutto nel momento in cui il disturbo da contrastare ha un entità tale da non poter controllare l'assetto con le sole ruote di reazione. Il sistema più utilizzato è il secondo, con il quale si evita il consumo di idrazina che si avrebbe coi propulsori e non si sviluppa un  $\Delta V$  indesiderato.

Nel momento in cui viene deciso un flyby di Cassini con Encelado, viene anche fatta una anticipazione di quale sistema di controllo di assetto dovrà essere utilizzato in base all'entità del disturbo. La previsione viene effettuata basandosi su modelli di densità dei getti dei geysers elaborati in seguito ad un accurato studio dei dati raccolti dal sistema di controllo di assetto.

I principali modelli di densità sono due e verranno illustrati in seguito nel capitolo 3.

Conoscendo la densità è possibile calcolare il drag e da questa forza risalire alla conseguente accelerazione. Inoltre conoscendo l'accelerazione si può ricavare la variazione di velocità  $\Delta V$  di Cassini durante il flyby.

## Capitolo 3

### Modelli di densità

In seguito ai flyby con Encelado eseguiti da Cassini, sono stati elaborati i dati raccolti dal sistema di controllo di assetto per costruire modelli di densità il più possibile affidabili.

Quando l'assetto della sonda viene modificato da un fattore indesiderato esterno (come la perturbazione dovuta ai geysers), si attivano le ruote di reazione che permettono di aggiustarlo modificando la propria velocità di rotazione e mantenendo costante puntamento della sonda. Attraverso i dati della telemetria è possibile risalire alla velocità di rotazione delle ruote e quindi alla coppia esercitata da esse per contrastare il disturbo. Questa coppia, dato che deve equilibrare la perturbazione, è quindi uguale e contraria a quella di disturbo, di cui in questo modo si conosce l'entità. La coppia è data da forza  $\times$  braccio, dove la forza è la resistenza aerodinamica, quindi conoscendo la geometria (area frontale di Cassini, il braccio della coppia  $b$ ) e noto il coefficiente di resistenza aerodinamica  $C_D$  è possibile ricavare una stima della densità in funzione del tempo dalla seguente equazione:

$$\vec{T} = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_D \times \vec{b} \quad (\text{Eq.1})$$

La densità è poi approssimata tramite diversi modelli, i cui parametri sono stati aggiustati in modo che i risultati rispecchino al meglio i dati reali.

### 3.1 Modello n.1 (Sarani 2010)

Il primo modello analizzato è descritto in dettaglio in [11]. I plumes sono modellizzati come un cono e un cilindro al cui interno la densità è in funzione dell'altezza dalla superficie di Encelado. Un set di otto coni circolari retti e otto cilindri (*Figura 3.1*) è localizzato in corrispondenza delle otto principali sorgenti (*Tabella 3.1*) lungo le quattro tiger stripes nella regione polare sud. Il vertice di ciascun cono viene posizionato a una profondità  $w = 1 \text{ km}$  sotto la superficie, mentre l'angolo di semiapertura dei coni è  $\beta_m = 45^\circ$ . Il raggio di ciascun cilindro è invece  $r_{jet} = 1 \text{ km}$ .

Cone	Tiger Stripe	Latitude(°)	Longitude (°W)
I	Baghdad	-81.5	32.8
II	Damascus	-79.4	315.5
III	Damascus	-81.3	292.8
IV	Alexandria	-72.9	148.7
V	Cairo	-78.6	72.3
VI	Baghdad	-87.1	231.4
VII	Baghdad	-74.6	29.8
VIII	Cairo	-82.1	115.5

Tabella 1 Latitudine e longitudine delle otto sorgenti principali

Il modello può essere applicato solo se l'altitudine di Cassini rispetto ad Encelado è minore di 8000 km. Per un tipico flyby il modello verifica ad ogni intervallo di tempo se lo spacecraft è all'interno di uno o più coni e cilindri. Nel caso sia all'interno di uno di questi ultimi allora risente delle particelle emesse dalle fratture sulla superficie, la densità è diversa da zero e varia con l'altitudine.

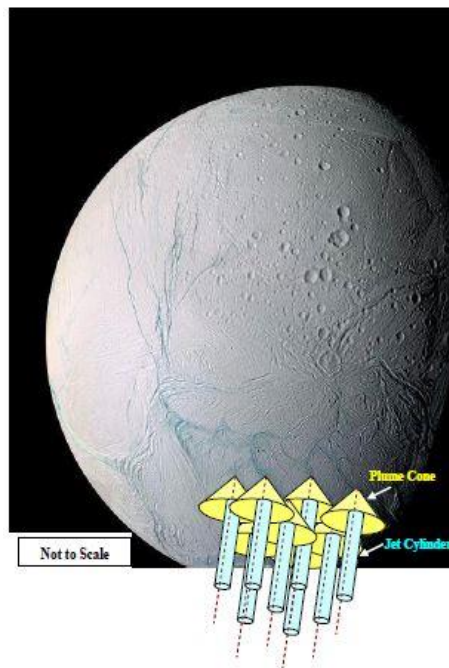


Figura 3.1 Schematizzazione della geometria dei geyser utilizzando coni e cilindri

Possiamo considerare Encelado come un ellissoide con dimensioni triassiali lungo  $x,y,z$  rispettivamente di:  $a=256$  km,  $b=251.4$  km,  $c=248.3$  km. Tutti i calcoli devono essere eseguiti

nel sistema di riferimento avente come origine il centro di Encelado e solidale ad esso durante il suo moto di rotazione (sistema body-fixed) in *Figura 3.2*.

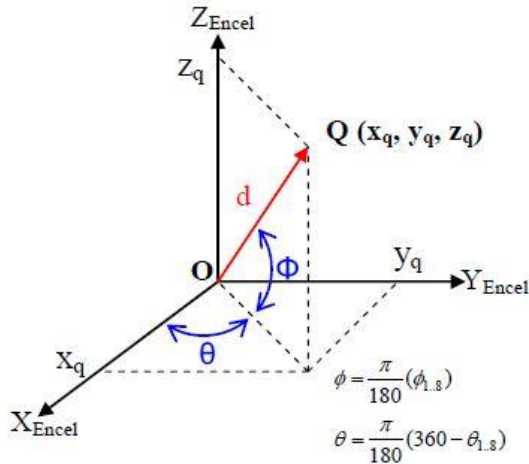


Fig 3.2 Sistema di riferimento centrato di Encelado

Il punto Q è il centro di attività del geyser sulla superficie e le sue coordinate sono  $\theta$ =longitudine,  $\varphi$ =latitudine,  $d$ =distanza dal centro di Encelado. Le prime due si ricavano dalla *tabella 3.1*,  $\varphi$  viene preso direttamente dalla tabella, mentre  $\theta$  usato nei calcoli è dato da  $360^\circ -$  (valore nella tabella).

$d$  viene calcolata per ciascuna delle 8 sorgenti utilizzando l'equazione parametrica dell'ellissoide (*Eq.2*):

$$\frac{x_q^2}{a^2} + \frac{y_q^2}{b^2} + \frac{z_q^2}{c^2} = 1$$

$$x_q = d \cos\varphi \cos\theta$$

$$y_q = d \cos\varphi \sin\theta \quad (\text{Eq.2})$$

$$z_q = d \sin\varphi$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos\varphi\cos\theta}{a}\right)^2 + \left(\frac{\cos\varphi\sin\theta}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sin\varphi}{c}\right)^2}}$$

In figura 3.3 è raffigurato un singolo plume e si può notare che  $d$  è il modulo del vettore  $\overrightarrow{OQ}$  calcolato con Eq.2, dove  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  sono i versori del sistema di riferimento di Encelado:

$$\overrightarrow{OQ} = d[(\cos\varphi\cos\theta)\hat{i} + (\cos\varphi\sin\theta)\hat{j} + (\sin\varphi)\hat{k}] \quad (\text{Eq.3})$$

E' necessario inoltre conoscere la posizione di Cassini rispetto ad Encelado e quindi conoscere  $\overrightarrow{OS}$ . Questo vettore può essere determinato con l'aiuto di Spice, un software NASA/NAIF presente anche come estensione per Matlab.

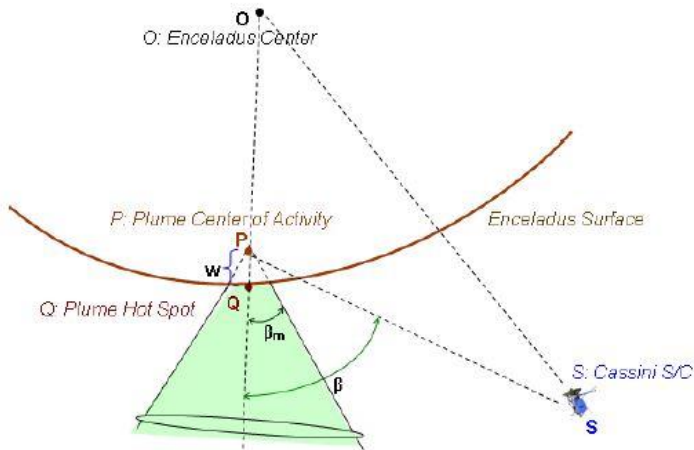


Fig 3.3 Raffigurazione di un singolo plume



Il vettore  $\overrightarrow{OP}$  unisce il centro di Encelado con il vertice del cono (Eq.4),  $\overrightarrow{PS}$  collega il vertice del cono allo spacecraft (Eq.5), mentre  $\overrightarrow{QS}$  collega il punto caldo sulla superficie di Encelado con lo spacecraft (Eq.6):

$$\overrightarrow{OP} = (d - w)[(\cos\varphi\cos\theta)\hat{i} + (\cos\varphi\sin\theta)\hat{j} + (\sin\varphi)\hat{k}] \quad (\text{Eq.4})$$

$$\overrightarrow{PS} = \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OP} \quad (\text{Eq.5})$$

$$\overrightarrow{QS} = \overrightarrow{OS} - \overrightarrow{OQ} \quad (\text{Eq.6})$$

Dopodichè si procede calcolando i seguenti versori (Eq.7):

$$\widehat{OQ} = \frac{\overrightarrow{OQ}}{|\overrightarrow{OQ}|}, \quad \widehat{PS} = \frac{\overrightarrow{PS}}{|\overrightarrow{PS}|}, \quad \widehat{QS} = \frac{\overrightarrow{QS}}{|\overrightarrow{QS}|} \quad (\text{Eq.7})$$

Ora è possibile ricavare l'angolo chiamato  $\beta$  in figura 3.3 con Eq. 8:

$$\beta = \frac{180}{\pi} \text{acos}(\widehat{PS} \cdot \widehat{OQ}) \quad (\text{Eq.8})$$

Se  $\beta < \beta_m$  allora Cassini è all'interno del cono e la densità è diversa da zero. Per verificare se sia anche all'interno del cilindro è necessario calcolare per ciascuna sorgente l'angolo  $\gamma$ , definito come l'angolo tra i vettori  $\overrightarrow{QS}$  e  $\overrightarrow{OQ}$  e calcolato con Eq.9.

$$\gamma = \text{acos}(\widehat{QS} \cdot \widehat{OQ}) \quad (\text{Eq.9})$$

Se vale Eq10 allora Cassini è anche all'interno del cono:

$$\gamma \leq \text{asin}\left(\frac{1}{|\overrightarrow{QS}|}\right) \quad (\text{Eq.10})$$

Se lo spacecraft è all'interno del cono, il contributo di densità dato da quella sorgente è (Eq.11):

$$\rho_{cone} = \frac{C}{(z+z_0)^{2-\varepsilon}} \quad (\text{Eq.11})$$

Dove:

- $C =$  coefficiente empirico  $= 3.911 \cdot 10^{-8} \frac{kg \ km^2-\varepsilon}{m^3}$
- $z =$  altezza del flyby rispetto ad Encelado
- $z_0 =$  altezza minima rispetto ad Encelado  $= 20 \text{ km}$
- $\varepsilon =$  esponente ricavato sperimentalmente  $= 0.1$

I parametri empirici  $C$ ,  $z_0$  ed  $\varepsilon$  sono stati calcolati in modo da minimizzare l'errore tra la densità ricavata dai dati reali delle ruote di reazione e quella ottenuta col modello durante E3.

Invece quando lo spacecraft è all'interno sia del cono che del cilindro, il contributo di densità dato da quella sorgente è di (Eq.12):

$$\rho_{cylinder} = k \frac{C}{(z+z_0)^{2-\varepsilon}} \quad (\text{Eq. 12})$$

In cui  $k$  è una costante il cui valore di 2.3 è stato ottenuto tramite l'elaborazione dei dati raccolti durante E5.

Per calibrare l'effettivo valore della densità, l'equazione 13 viene utilizzata quando vengono intercettati più coni/cilindri:

$$\rho_{effettiva} = \sum_{i=1}^{\alpha_{cone}} \rho_{cone}(i) + \sum_{j=1}^{\alpha_{cylinder}} \rho_{cylinder}(j) \quad (\text{Eq.13})$$

Dove:

- $\alpha_{cone} =$  numero di soli coni intercettati

- $\alpha_{cylinder}$  = numero di cilindri intercettati

I valori dei parametri utilizzati durante i calcoli come  $C$ ,  $w$ ,  $\varepsilon$ ,  $z_0$ ,  $\beta_m$  possono essere modificati: non è escluso che in seguito a studi futuri più precisi i valori cambino in modo da modellizzare in modo migliore la densità. Inoltre si potrebbero analizzare gli effetti delle maree che influenzano l'attività dei geysers e modificare i parametri in funzione della vicinanza di Encelado a Saturno.

I grafici dell'andamento della densità nel tempo calcolata con questo modello per E3, E9, E19 sono raffigurati in figura 3.4, 3.5, 3.6.

Il tempo è in secondi passati dopo ECA, dove ECA è l'approccio più ravvicinato.

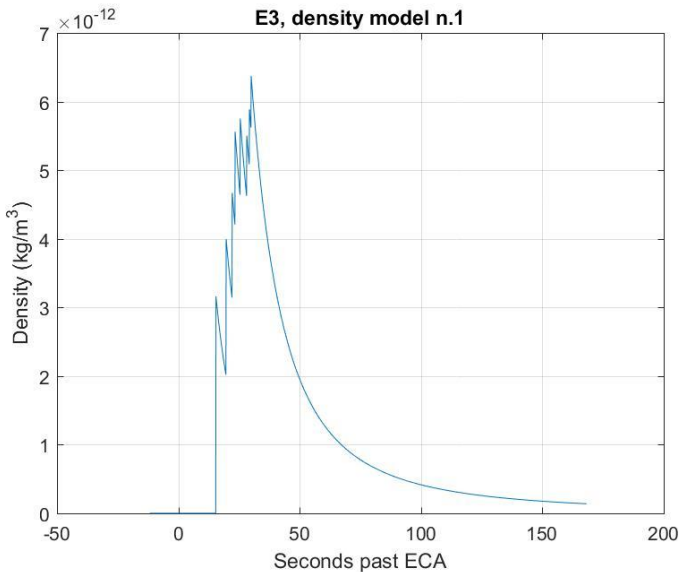


Figura 3.4

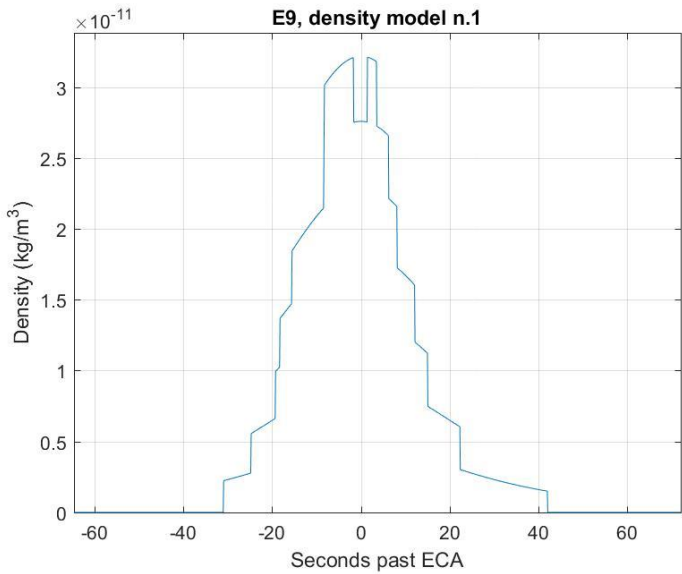


Figura 3.5

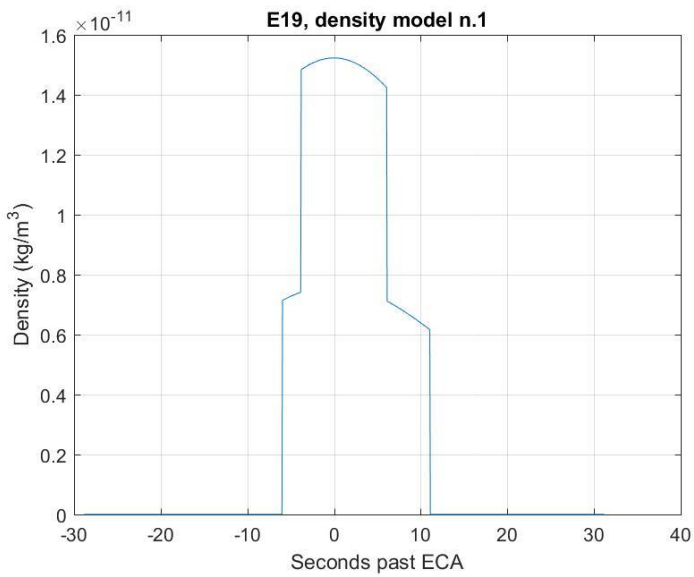


Figura 3.6

**E3**

$$\rho_{max} = 6.375 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho max} = 30 \text{ s past ECA}$$

**E9**

$$\rho_{max} = 3.211e - 11 \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho max} = 1.5 \text{ s past ECA}$$

**E19**

$$\rho_{max} = 1.523e - 11 \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho max} = 0 \text{ s past ECA}$$

## 3.2 Modello n.2 (Lee 2013)

Il secondo modello di densità è di tipo esponenziale ed è stato elaborato in seguito all'analisi dei dati ottenuti da E3 (2008) ed è descritto nel documento [9]. E' applicabile non solo ad E3 ma fornisce buoni risultati anche per E5 (2008), E7 (2010), E9 (2011) ed E14 (2012) a causa della similarità delle traiettorie e dei getti incontrati lungo il sorvolo.

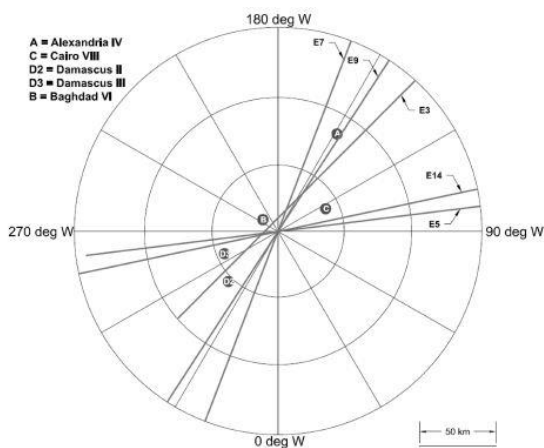


Fig. 3.7 Ground track di E3, E5, E7, E9, E14

In *figura 3.7* sono rappresentate le proiezioni delle traiettorie sulla superficie di Encelado e le principali quattro sorgenti intercettate: Cairo VIII, Baghdad VI e Damascus II e III. La localizzazione di ciascuna sorgente è invece riportata in *tabella 3.2*, in cui  $\delta$  è la colatitudine ed è definita positivo in senso antiorario.

Plume sources	Baghdad source VI	Cairo source VIII	Damascus source II	Damascus source III
South latitude ( $\gamma_{LAT}$ ), deg	87.1	82.1	79.4	81.3
West longitude ( $\gamma_{LON}$ ), deg	234.1	115.5	315.5	292.8
Offset distance ( $\Delta$ ), km	12.7	11.6	0.40	14.4
Colatitude $\delta = 90 - \gamma_{LAT}$ , deg	-2.9	+7.9	-10.6	-8.7

Tabella 3.2 Localizzazione delle sorgenti intercettate da Cassini durante E3

Vengono definiti  $r_i$  come distanza radiale di Cassini dal centro dell' $i$ -esimo geyser e  $\theta_i$  come angolo tra il vettore  $r_i$  e l'asse di simmetria dell' $i$ -esimo geyser.  $r_i$  e  $\theta_i$  sono raffigurati in *figura 3.8* e la loro espressione è indicata in *Equazione 14*:

$$p_i(t) = (R_E + h_{ECA})\cos\alpha - v\sin\alpha - R_E\sin\delta_i$$

$$q_i(t) = (R_E + h_{ECA})\sin\alpha + v\cos\alpha - R_E\cos\delta_i \quad (\text{Eq.14})$$

$$r_i(t) = \sqrt{p_i(t)^2 + q_i(t)^2 + \Delta_i^2}$$

$$\theta_i(t) = \left| \arctg\left(\frac{\sqrt{p_i(t)^2 + \Delta_i^2}}{q_i(t)}\right) - \delta_i \right|$$

Con:

$i = 1 \dots 4$ , rappresenta la  $i$ -esima sorgente

- $R_E$  = Raggio medio di Encelado = 252.3 km
- $h_{ECA}$  = altitudine closest approach
- $\alpha$  = latitudine sud del closest approach
- $v$  = velocità relativa di Cassini rispetto ad Encelado

Per E3 vale:

$$h_{ECA} = 47.9 \text{ km}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$v = 14.41 \text{ km/s}$$

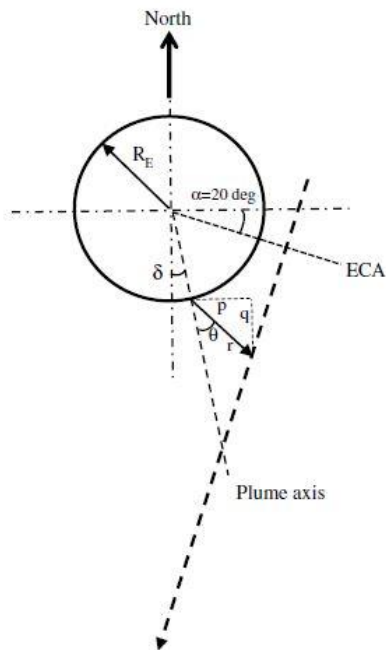


Fig. 3.8 Proiezione del flyby E3 sul piano formato dalla traiettoria e dall'asse di rotazione di Encelado. Non è in scala.

In questo modello la densità dovuta a ciascuna sorgente è funzione della distanza radiale e angolare ( $r, \theta$ ) dal geysier. Se  $50 \text{ km} < r < 1400 \text{ km}$  il modello è applicabile e la densità è espressa con la seguente equazione (Eq. 15):

$$\rho_i(r_i, \theta_i) = k_{\rho i} \left( \frac{R_E}{r_i} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\theta_i}{k_{\theta i}}} \quad (\text{Eq.15})$$



Dove  $k_{\rho i}$  e  $k_{\theta i}$  sono coefficienti che tengono conto delle caratteristiche dei getti, come ad esempio dell'intensità. Per ciascuna sorgente sono stati assunti gli stessi valori per  $k_{\rho}$  e gli stessi per  $k_{\theta}$ .

I coefficienti sono stati calcolati in modo da minimizzare l'errore che intercorre tra la densità calcolata col modello e quella ricostruita tramite i dati provenienti dalle ruote di reazione. I valori che forniscono una corretta correlazione tra le due densità sono:

$$k_{\rho} = 5.03 \times 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{\theta} = 0.49044 \text{ rad}$$

E' possibile calcolare la densità totale riscontrata durante un flyby con *eq.16*:

$$\rho_{tot}(t) = \sum_{i=1}^4 \rho_i(t) \quad (\text{Eq.16})$$

Per migliorare l'accuratezza del modello si potrebbe considerare la densità come funzione anche della distanza di Encelado da Saturno e si potrebbero continuare gli studi per ricercare valori di  $k_{\rho}$  e  $k_{\theta}$  sempre più precisi. Inoltre si potrebbero considerare più sorgenti di getti e vincolare la loro intensità relativa sulla base delle misurazioni effettuate dalla sonda Cassini.

In figura 3.9 viene fatto un confronto tra l'andamento della densità di E3 ricavata dai dati delle ruote di reazione e quella calcolata col modello: i risultati del modello risultano essere molto fedeli a quelli reali per questo specifico flyby. I grafici dell'andamento della densità nel tempo calcolata con questo modello per E3, E9, E19 sono raffigurati in figura 3.10, 3.11,

3.12.

Il tempo è in secondi passati dopo ECA, dove ECA è l'approccio più ravvicinato.

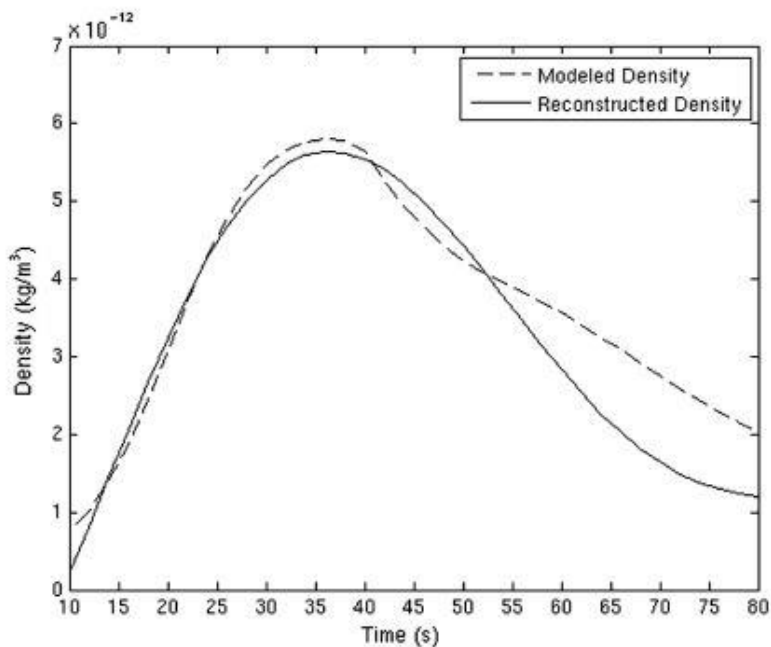


Fig.3.9

La differenza tra la densità ricavata dai dati di Cassini e quella ottenuta invece dal modello è del 20% circa (si veda [9]). Questa informazione sarà particolarmente utile nel capitolo 5 durante l'analisi di sensitività.

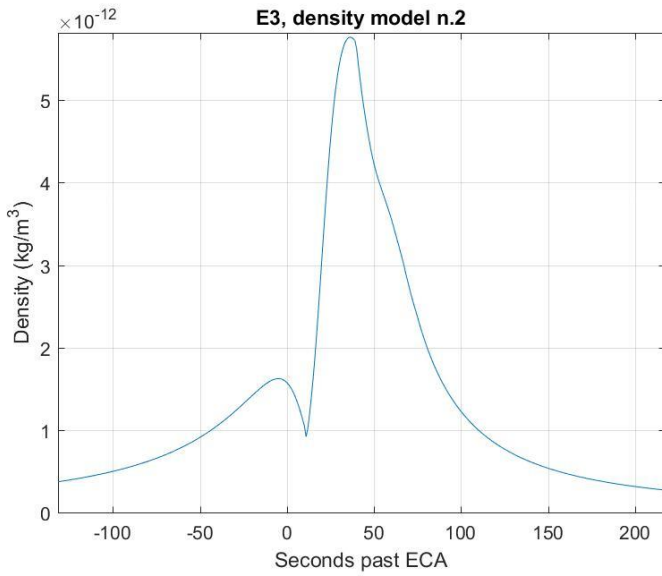


Fig.3.10

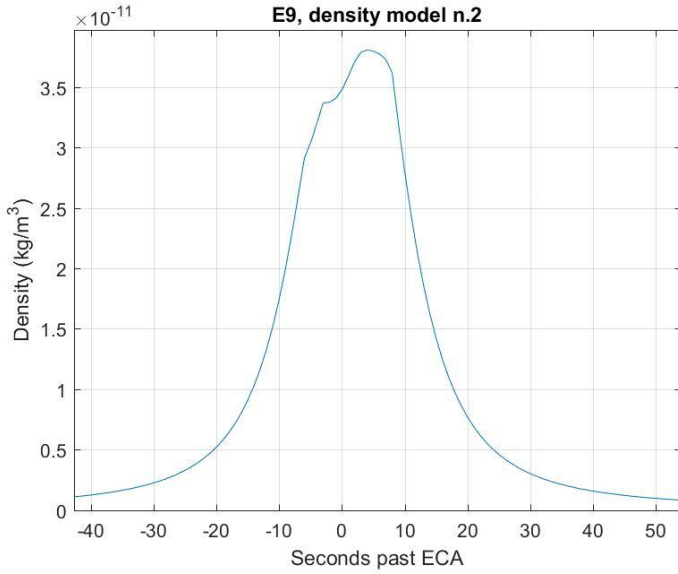


Fig. 3.11

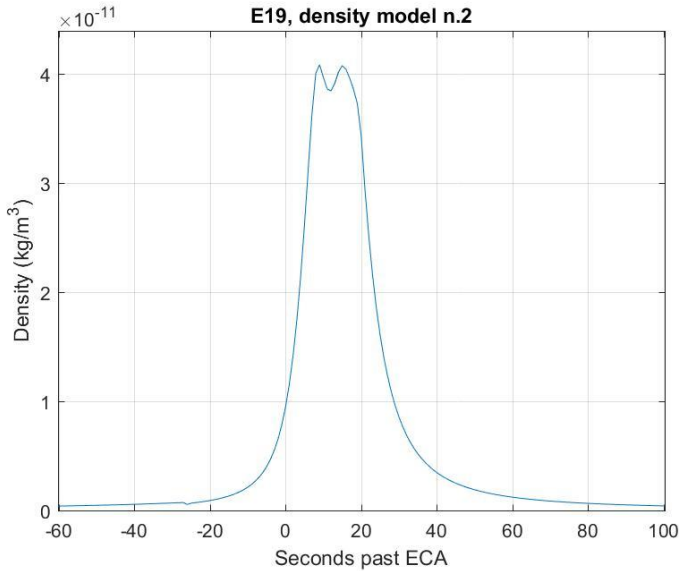


Fig.3.12

**E3**

$$\rho_{max} = 5.764 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho_{max}} = 36 \text{ s past ECA}$$

**E9**

$$\rho_{max} = 3.805 \cdot 10^{-11} \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho_{max}} = 4 \text{ s past ECA}$$

**E19**

$$\rho_{max} = 4.079 \cdot 10^{-11} \frac{kg}{m^3}$$

$$t_{\rho_{max}} = 9 \text{ s past ECA}$$

In [8] è presente una variante di questo modello, in cui vengono considerate soltanto tre sorgenti: Cairo VIII, Damascus II e Alexandria IV. La localizzazione di queste sorgenti è riportata in *tabella 3.3*:

Plume Sources	Alexandria	Cairo	Damascus
South latitude ( $\gamma_{LAT}$ )*, deg	72.9	82.1	79.4
West longitude ( $\gamma_{LON}$ )*, deg	148.7	115.5	315.5
$\Delta = R_E \times \cos(\gamma_{LAT}) \times  \gamma_{LON} - 135  / 57.3^\circ$ , km	17.8	11.8	0.40
Colatitudes $\delta = 90 - \gamma_{LAT}$ , deg*	+17.1	+7.9	-10.6

Tabella 3.3: Localizzazioni delle sorgenti intercettate da Cassini durante E3

Il procedimento per il calcolo della densità è lo stesso del modello descritto in [9], ma  $k_{\rho i}$  e  $k_{\theta i}$  ( $i =$  Alexandria, Cairo, Damascus) cambiano:

$$k_{\rho, Alexandria} = 0.55 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{\rho, Cairo} = 10.3 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{\rho, Damascus} = 8.5 \cdot 10^{-12} \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{\theta i} = 0.36 \text{ rad} \quad \text{con } i = \text{Alexandra, Cairo, Damascus}$$

Per eseguire i calcoli e ottenere così i grafici necessari allo scopo della tesi è stato utilizzato il modello esponenziale che considera 4 sorgenti, in quanto si è ritenuto essere più preciso.

# Capitolo 4

## Drag

Durante un flyby con Encelado, Cassini si trova a percorrere un tratto di orbita in cui non vi è il vuoto, ma sono presenti particelle che eruttate dalle fratture presenti sulla superficie, raggiungono chilometri di altezza, disturbando il moto della sonda. Cassini è sottoposto a una forza di resistenza (drag) che tende a modificare la sua velocità. Piccolissime variazioni nella velocità possono portarlo a cambiare completamente la traiettoria allontanandosi da quella prevista e calcolata accuratamente da terra, provocando problemi nella missione. E' molto utile capire fino a che punto i getti possano influire sul cambiamento della velocità per intervenire coi sistemi di controllo di assetto per mantenere l'orbita di progetto.

Il calcolo del drag è un passaggio fondamentale per poter stimare attraverso i modelli il  $\Delta V$  a cui è sottoposta la sonda.

Conoscendo il valore della densità nel tempo, è possibile calcolare la forza di resistenza che incontra la sonda durante il sorvolo della regione polare sud.

La formula da utilizzare è la seguente (eq.17):

$$D(t) = \frac{1}{2} \rho(t) S V(t)^2 C_D \quad (\text{Eq.17})$$

Con:

- $\rho = \text{densità} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
- $S = \text{superficie di Cassini nella direzione della velocità} [m^2]$
- $V = \text{modulo della velocità di Cassini rispetto ad Encelado} \left[ \frac{m}{s} \right]$ , calcolata con *Spice*
- $C_D = \text{coefficiente di resistenza aerodinamica}$

Per  $S$  e  $C_D$  si sono assunti valori costanti:

- $S = 18.401 m^2$ , valore esatto di E3 ed E5 ma che è stato assunto come valido per tutti i flyby (valore riportato in [11]);
- $C_D = 2.1$ , conosciuto per ricerche passate. (Valore riportato in [11]).

L'andamento della resistenza calcolata con i due modelli di densità differenti per E3, E9 ed E19 è indicata in figure 4.1, 4.2, 4.3.

E' possibile notare che la differenza maggiore tra i due modelli si ha per E19: è possibile che il modello n.2 elaborato per E3 non sia adatto a descrivere questo particolare flyby.

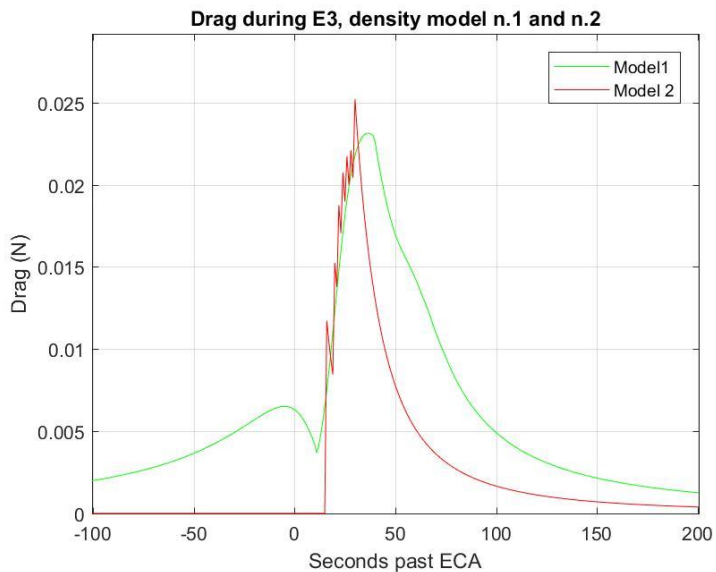


Fig.4.1

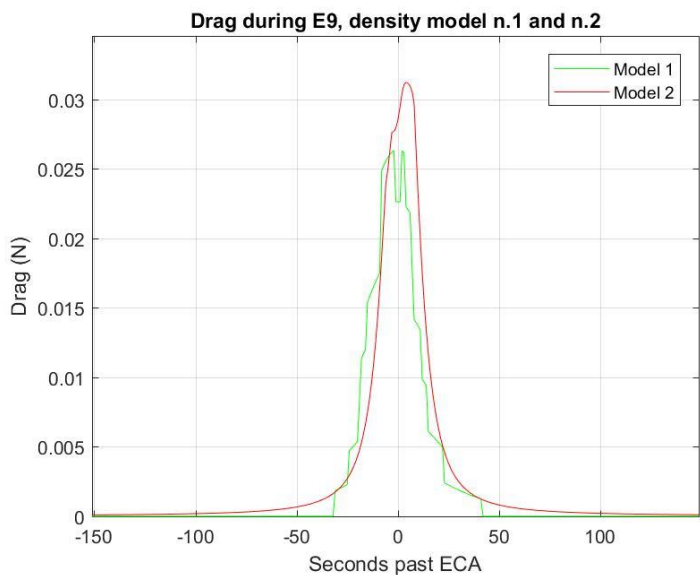


Fig.4.2



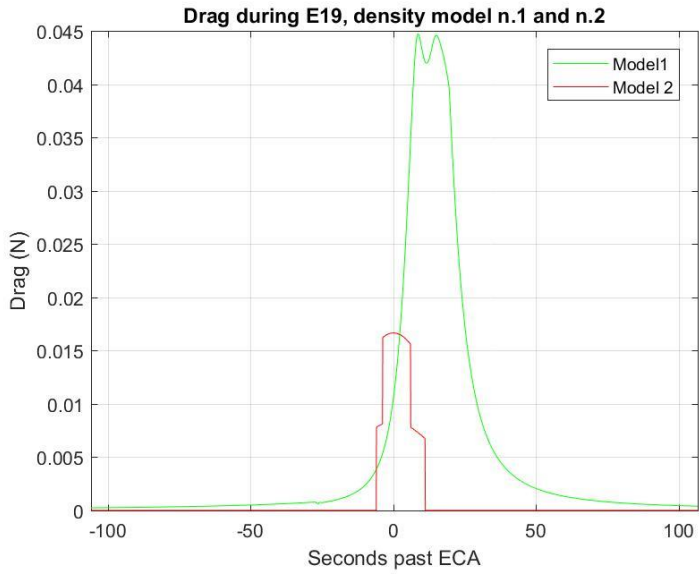


Fig.4.3

## Capitolo 5

### Analisi dell'incertezza dei modelli

Ciascuno dei due modelli di densità descritti nel capitolo 3 includeva dei parametri il cui valore era dato negli articoli di riferimento senza alcuna incertezza, come  $C$ ,  $\epsilon$ ,  $z_0$  nel primo e  $k_\rho$  e  $k_\theta$  nel secondo. Il loro valore in realtà è incerto, quindi anche la densità e il  $\Delta V$  che ne derivano lo sono. Per quantificare il grado di imprecisione si ricorre a un approccio probabilistico utilizzando il metodo Monte Carlo partendo da un'analisi di sensitività dei parametri in gioco.

#### 5.1 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività di un modello matematico è quel processo attraverso il quale è possibile studiare la variazione della risposta del modello al variare di uno o più fattori di input (parametri) e discriminare tra fattori influenti e non influenti. I valori dei fattori in input vengono perturbati singolarmente all'interno di un preciso campo di variazione al fine di identificarne la sensitività. Questo processo permette di determinare quali parametri hanno un effetto sul modello trascurabile e non, lineare o non lineare. In particolare

sono poco significativi quei parametri la cui variazione non produce cambiamenti rilevanti nell'output del modello. Conoscere quelli che invece lo influenzano in modo significativo ne migliora la calibrazione.

Per eseguire l'analisi con Matlab, viene creato per ciascun parametro un vettore con la funzione *linspace* con N=1000 elementi equispaziati all'interno di uno specifico intervallo di variazione del parametro considerato e viene poi calcolata la densità ad un preciso istante di tempo utilizzando uno per volta gli elementi del vettore. Se chiamiamo il parametro iniziale che viene fornito negli articoli esaminati [9] e [11] "parametro0", viene rappresentato su un grafico l'andamento del rapporto tra la densità ottenuta in questo modo cioè rho e quella ottenuta con il parametro0 cioè rho0, rispetto al rapporto tra gli elementi del vettore e il parametro0.

Dopodiché si risale ai valori di quest'ultimo rapporto per cui rho/rho0 vale 0.8 e 1.2 e quindi ai due elementi del vettore che soddisfano questo risultato, chiamati parametro1 e parametro2. Si sono scelte variazioni della densità del 20% rispetto al valore iniziale perché questo è l'errore percentuale indicato in [11] del modello rispetto ai dati reali. Parametro1 e parametro2 vengono entrambi espressi in funzione di parametro0 nel seguente modo (eq.18):

$$\begin{aligned} \text{parametro1} &= \text{parametro0} + x1 \cdot \text{parametro0} & (\text{Eq.18}) \\ \text{parametro2} &= \text{parametro0} + x2 \cdot \text{parametro0} \end{aligned}$$

Viene poi calcolata  $\sigma$  come media di x1 e x2 perché le relazioni potrebbero essere non lineari. Questo valore servirà poi nella successiva analisi Monte Carlo:

$$\sigma_{\text{parametro}} = \frac{|x1|+|x2|}{2} \quad (\text{Eq.19})$$

Più il valore di  $\sigma$  è piccolo, più il parametro influenza il modello.

## 5.1.2 Analisi di sensitività dei parametri del modello n.1

I parametri presenti nel primo modello sono  $C$ ,  $\varepsilon$ ,  $z_0$  e una loro variazione influenza in modo differente il risultato del modello.

E' stata eseguita l'analisi di sensitività di ciascun parametro ed è emerso che  $C$  è il più significativo infatti (facendo riferimento ad *equazione 10*) la densità è direttamente proporzionale a questo coefficiente.

### 5.1.2.1 Analisi di sensitività di $C$

Il grafico che si ottiene dall'analisi di sensitività di  $C$  è raffigurato in figura 5.1. Si nota la dipendenza lineare.

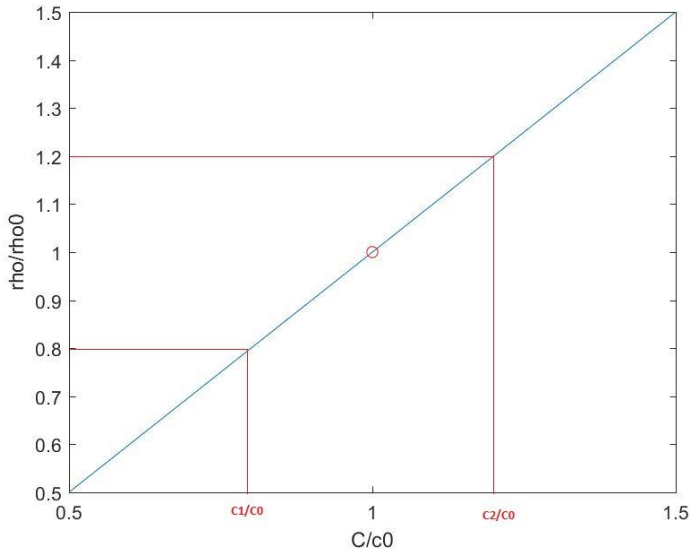


Fig 5.1

Si riportano i calcoli che hanno portato ad ottenere  $\sigma_c$  in eq.20:

$$C_0 = 3.911 \cdot 10^{-8} \frac{kg \cdot km^{2-\varepsilon}}{m^3}$$

$$C_1 = 0.8 C_0 = C_0 - 0.2 C_0 \quad (\text{Eq.20})$$

$$C_2 = 1.2 C_0 = C_0 + 0.2 C_0$$

$$\sigma_c = \frac{0.2 + 0.2}{2} = 0.2$$

### 5.1.2.2 Analisi di sensitività di $\varepsilon$

La dipendenza questa volta non è lineare, ma se ne discosta di poco.

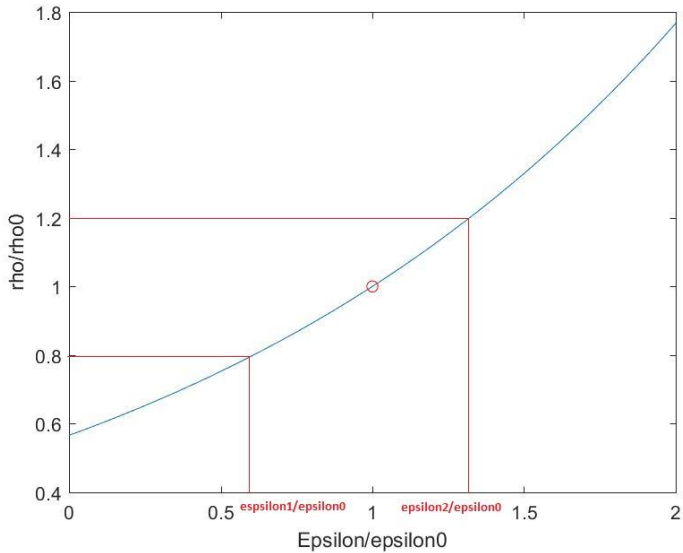


Fig.5.2

In equazione 21 sono indicati i calcoli per ottenere  $\sigma_\varepsilon$  :

$$\varepsilon_0 = 0.1$$

$$\varepsilon_1 = 0.0609 = \varepsilon_0 - 0.391 \varepsilon_0 \quad (\text{Eq.21})$$

$$\varepsilon_2 = 0.1310 = \varepsilon_0 + 0.319 \varepsilon_0$$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{0.391 + 0.319}{2} = 0.355$$

Siccome la relazione non è lineare, per ottenere una variazione della densità del 20% è necessaria una variazione del parametro del 35.5%.

### 5.1.2.3 Analisi di sensitività di $z_0$

Come si può notare dalla figura 5.3, la curva si discosta di poco dall'andamento lineare. In questo caso non è possibile considerare variazioni del 20% perché a  $\rho/\rho_0=1.2$  corrispondono valori negativi di  $z_0$  che è per definizione positivo perché rappresenta un'altezza. E' quindi opportuno considerare variazioni meno considerevoli. In equazione 28 sono ripostati i passaggi per il calcolo di  $\sigma_z$  considerando variazioni della densità del 5%.

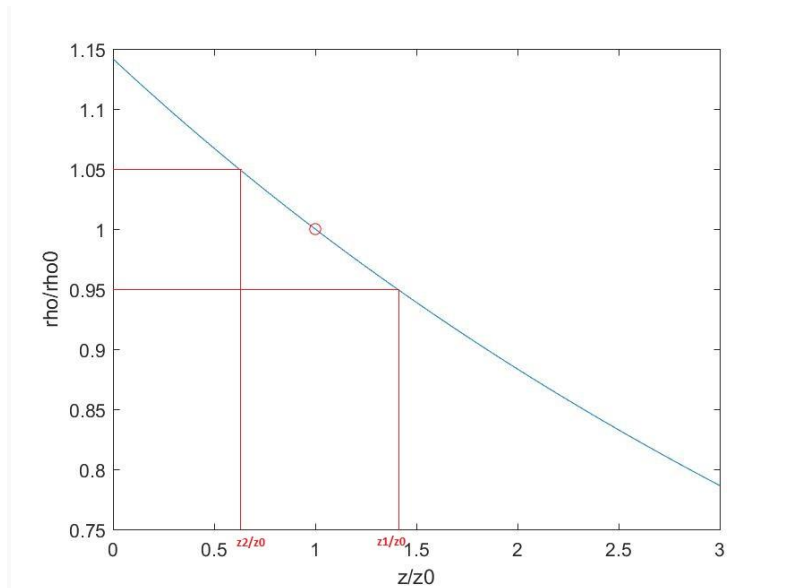


Fig.5.3

$$z_0 = 20$$

$$z_1 = 28.1081 = z_0 + 0.405405 z_0 \quad (\text{Eq.22})$$

$$z_2 = 12.4925 = z_0 - 0.375375 z_0$$

$$\sigma_z = \frac{0.405405 + 1.375375}{2} = 0.39039$$

Essendo  $\sigma_c < \sigma_\varepsilon < \sigma_z$ , (nonostante per  $z_0$  si sia considerato un intervallo più piccolo, cioè del 5%) è  $C$  il parametro che più influenza il modello, dopodiché influiscono  $\varepsilon$  e  $z_0$ .

### 5.1.3 Analisi di sensitività dei parametri del modello n.2

I parametri presenti nel secondo modello sono  $k_\rho$  e  $k_\theta$  e dalle analisi di sensitività emerge che è l'ultimo ad essere il più significativo.

#### 5.1.3.1 Analisi di sensitività di $k_\rho$

Il grafico che si ottiene con l'analisi di  $k_\rho$  è riportato in *figura 5.4* e i calcoli effettuati per ottenere  $\sigma_{k_\rho}$  sono indicati in *equazioni 23*.



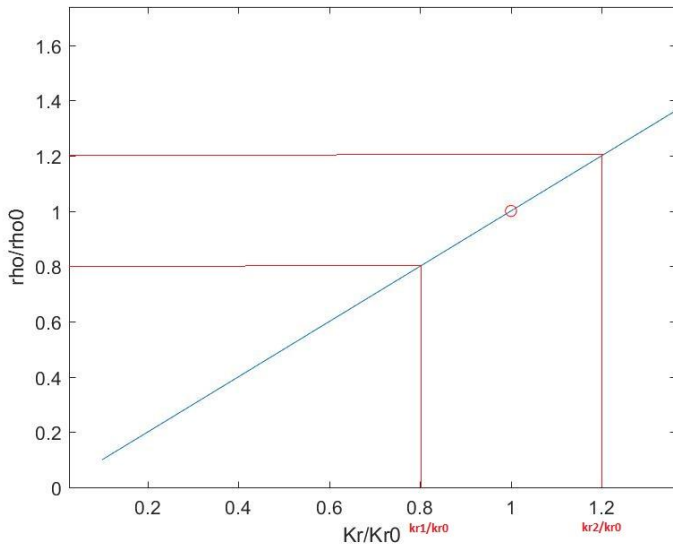


Fig.5.4

$$k_{\rho 0} = 5.03 \cdot 10^{-12} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_{\rho 1} = k_{\rho 0} - 0.2 k_{\rho 0} \quad (\text{Eq.23})$$

$$k_{\rho 2} = k_{\rho 0} + 0.2 k_{\rho 0}$$

$$\sigma_{k\rho} = \frac{0.2 + 0.2}{2} = 0.2$$

### 5.1.3.2 Analisi di sensitività di $k_{\theta}$

In questo caso non c'è una dipendenza lineare tra il parametro e la densità. Il grafico che ne deriva è raffigurato in figura 5.5 mentre il calcolo di  $\sigma_{k\theta}$  è indicato in *equazioni 24*.

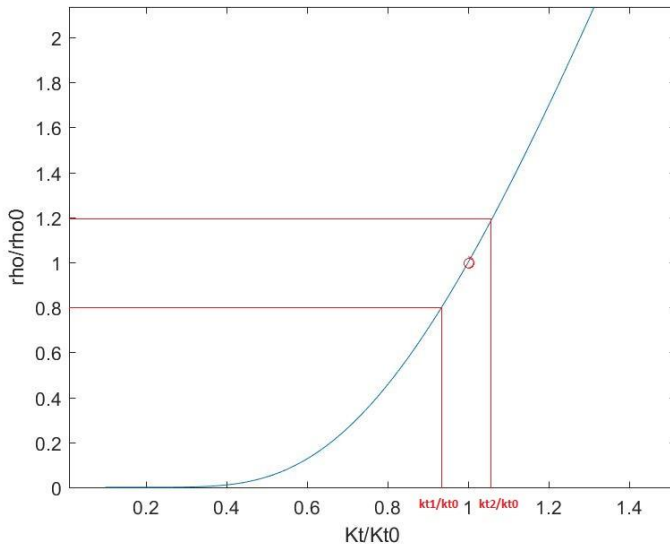


Fig. 5.5

$$k_{\theta 0} = 0.49043 \text{ rad}$$

$$k_{\theta 1} = 0.4585 = k_{\theta 0} - 0.06512 \quad (\text{Eq.24})$$

$$k_{\theta 1} = 0.5210 = k_{\theta 0} + 0.0623$$

$$\sigma_{k\theta} = \frac{0.06512 + 0.0623}{2} = 0.06371$$

A seguito di questa analisi è possibile affermare che  $k_{\theta}$  è il parametro che più influisce sulla densità essendo  $\sigma_{k\rho} > \sigma_{k\theta}$ .

## 5.2 Metodo Monte Carlo

I Metodi Monte Carlo sono un'ampia classe di metodi computazionali basati sul campionamento casuale per ottenere risultati numerici. L'uso di questa simulazione su un modello consente di testare facilmente e con elevato grado di dettaglio gli effetti di modificazioni nelle variabili di ingresso. Il problema viene risolto numericamente, producendo un numero  $N$  sufficientemente elevato di possibili combinazioni dei valori che le variabili di ingresso possono assumere e calcolandone il relativo output sulla base delle equazioni del modello. Per costruire ciascuna delle  $N$  combinazioni viene generato casualmente un valore per ciascuna variabile di input, in accordo con la distribuzione di probabilità specificata e rispettando le correlazioni tra variabili.

Viene creato quindi un vettore con  $N=1000$  elementi per ciascun parametro in questo modo (eq.25):

$$parametro = parametro0 \cdot [1 + randn(1,N) \cdot \sigma_{parametro}]$$

(Eq.25)

In cui la funzione  $randn(1,N)$  genera un vettore di lunghezza  $N$  di numeri random con distribuzione normale gaussiana.  $\sigma_{parametro}$  invece è stata calcolata con l'analisi di sensitività. In questo modo se il modello dipende da  $n$  parametri, si avranno  $n$  vettori con distribuzione gaussiana con 1000 elementi.

Per ciascun elemento del vettore che identifica l'intervallo temporale del flyby da esaminare, viene calcolata la densità con ciascun elemento del vettore  $parametro$ : si hanno quindi 1000 valori di densità per ciascun istante di tempo. Viene poi calcolata la densità media (mean density) di questi 1000 valori con la funzione  $mean$  di Matlab e la deviazione standard ( $\sigma_\rho$ ) con  $std$ .

Tali parametri permettono infatti di identificare univocamente le

proprietà statistiche della densità, supponendo che abbia una distribuzione gaussiana. L'ipotesi di gaussianità è stata verificata analizzando la distribuzione dei valori di densità, che è risultata seguire una distribuzione normale con buona approssimazione.

In un grafico viene poi rappresentato l'andamento di mean density (curva blu), mean density +  $\sigma_D$  (curva rossa) e mean density -  $\sigma_D$  (curva gialla).

Una volta calcolata la densità media si procede al calcolo della drag media (mean drag) e della sua deviazione standard  $\sigma_D$ . Allo stesso modo per ciò che è stato effettuato per la densità, viene raffigurato in un grafico l'andamento di mean drag (curva blu), mean drag +  $\sigma_D$  (curva rossa), mean drag -  $\sigma_D$  (curva gialla).

Lo scopo della simulazione Monte Carlo è quello di individuare la zona compresa tra la curva gialla e quella rossa: dato che per la creazione dei vettori abbiamo utilizzato una distribuzione normale gaussiana c'è la probabilità del 67% che il valore reale si trovi al suo interno. Questo risultato è molto significativo, in quanto permette di tenere conto delle incertezze del modello e di adottare un approccio probabilistico per i suoi risultati.

I grafici della densità e del drag calcolati col modello n.1 per i flyby E3, E9, E19 sono raffigurati in figure 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11.

I grafici della densità e del drag calcolati col modello n.1 per i flyby E3, E9, E19 sono raffigurati in figure 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17.

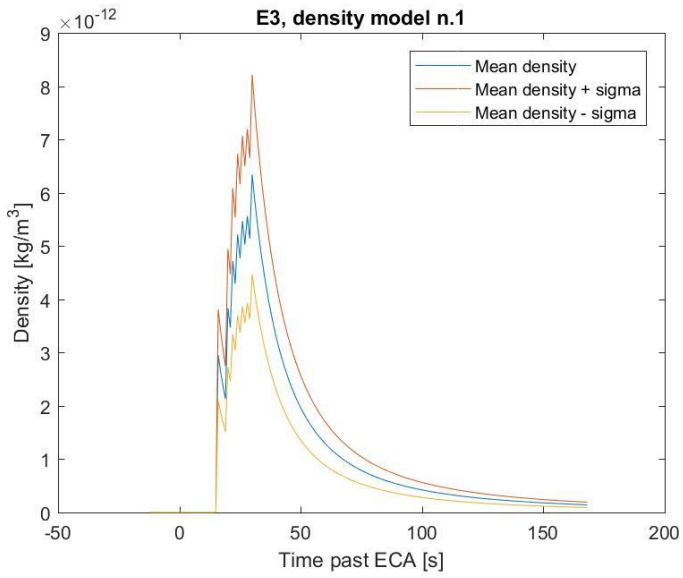


Fig.5.6

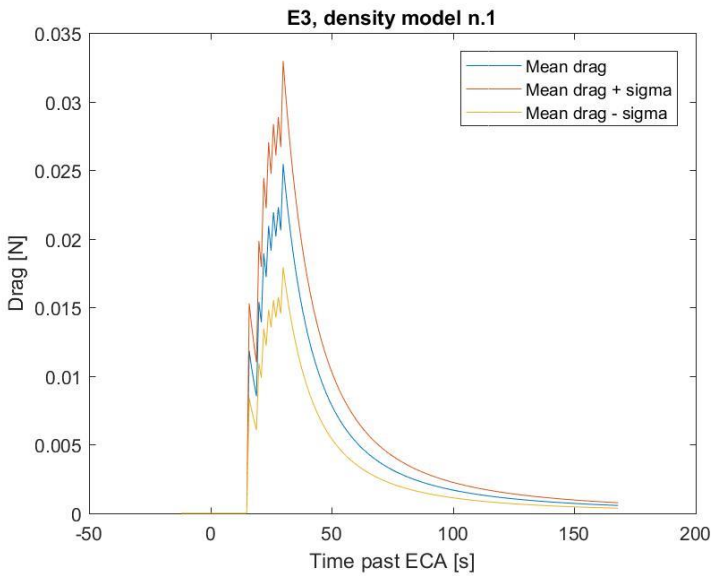


Fig.5.7

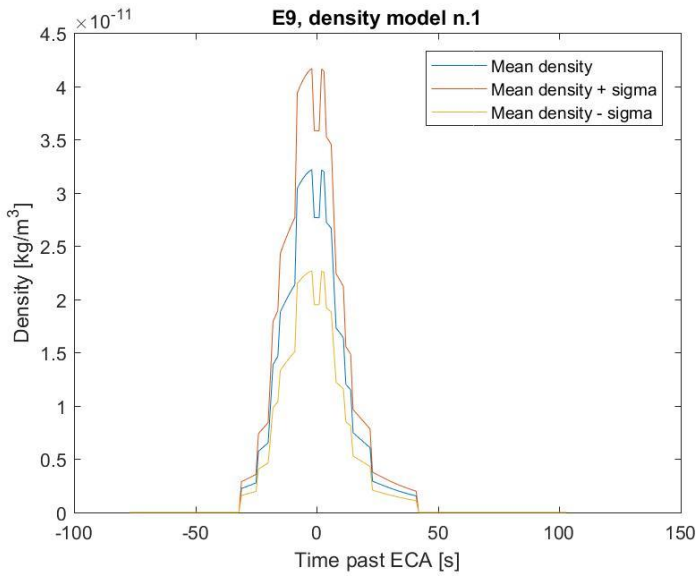


Fig.5.8

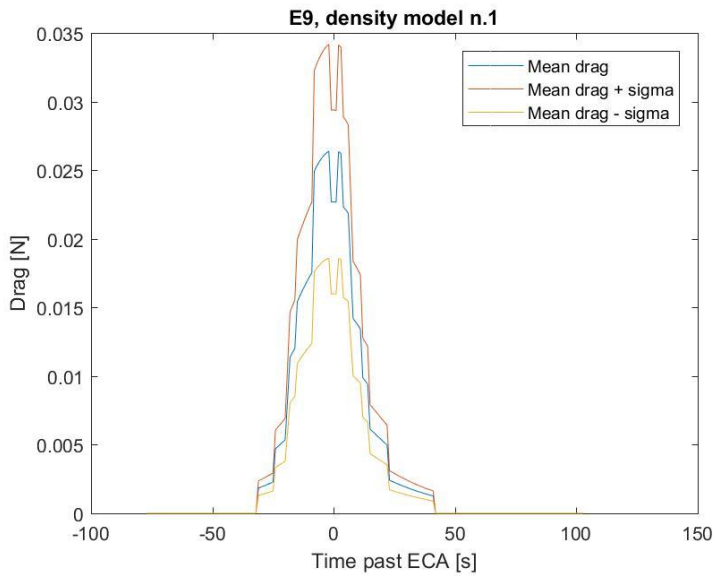


Fig. 5.9

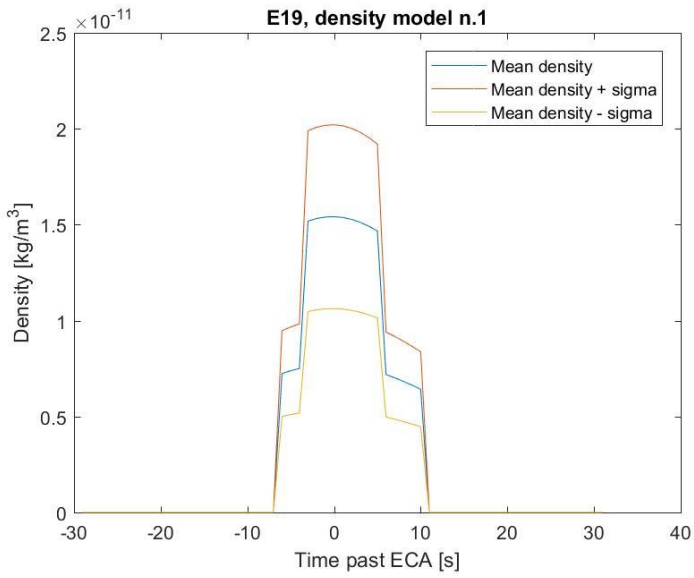


Fig.5.10

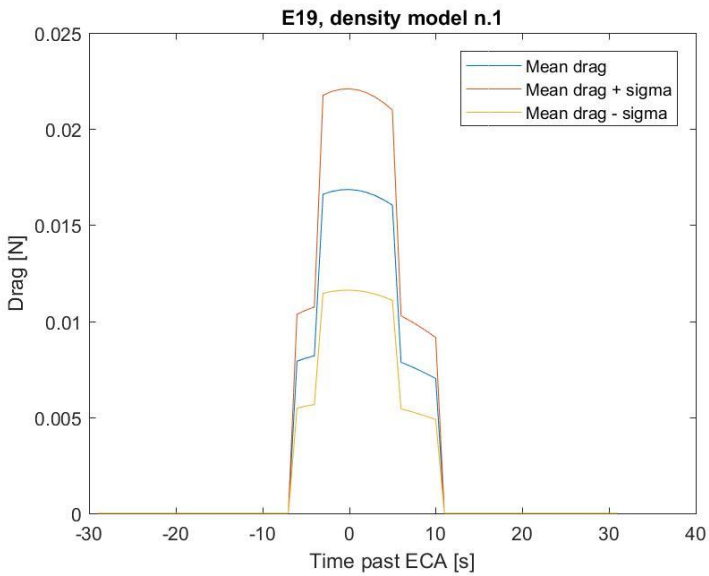


Fig. 5.11

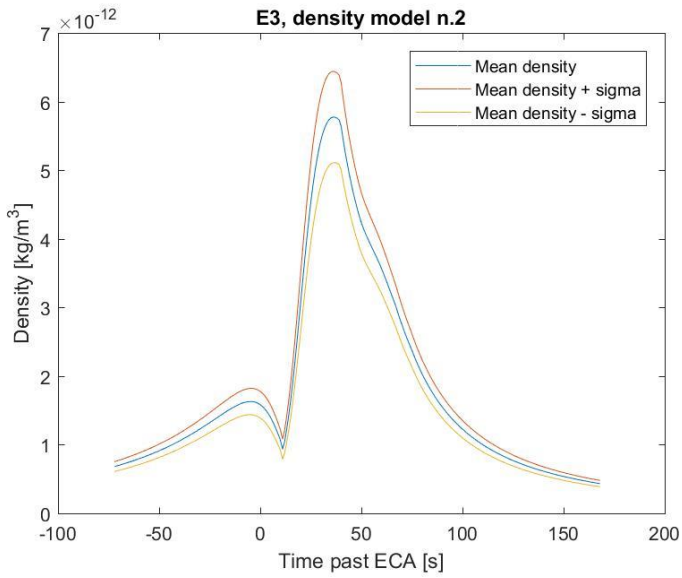


Fig. 5.12

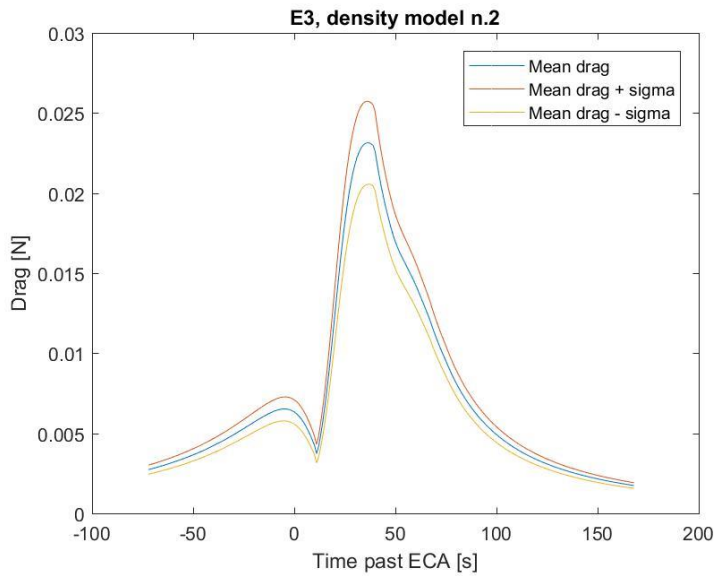


Fig.5.13



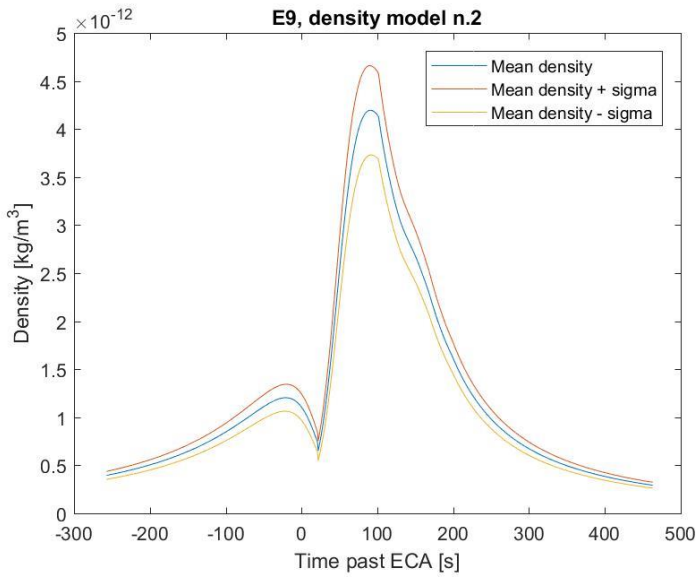


Fig. 5.14

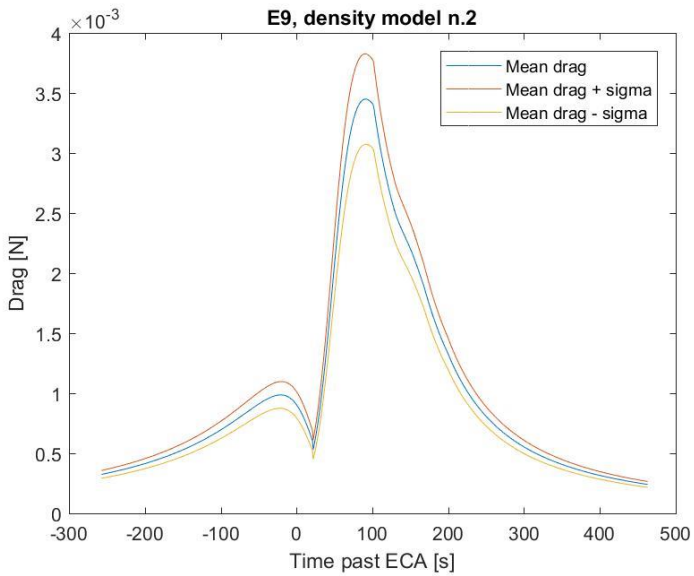


Fig.5.15

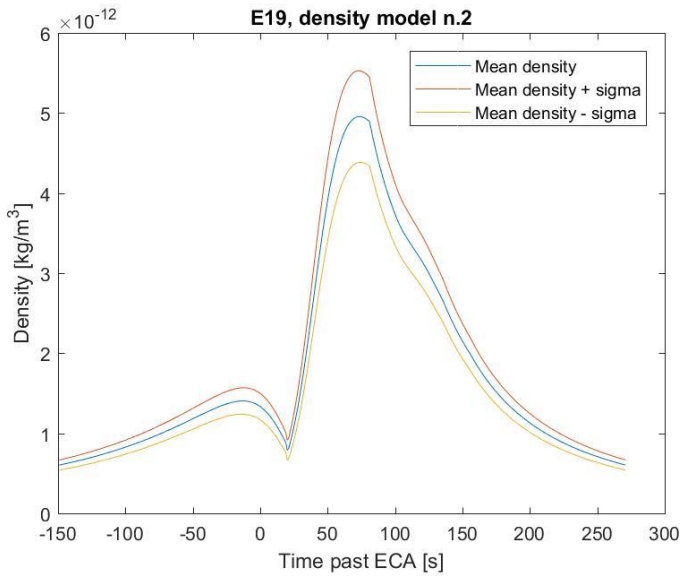


Fig. 5.16

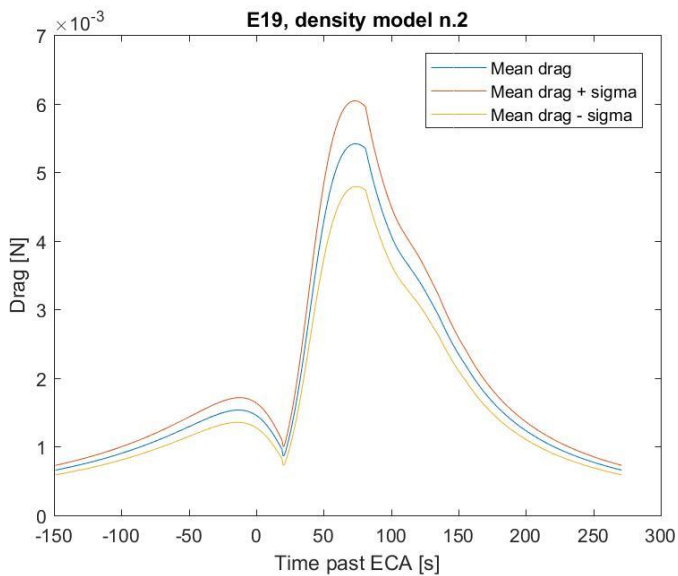


Fig.5.17

## Capitolo 6

### $\Delta V$

Conoscendo la forza di drag (capitolo 4) a cui è sottoposta Cassini si può calcolare l'accelerazione mediante il secondo principio della dinamica (eq 26):

$$\vec{D}(t) = m(t)\vec{a}(t) \quad (\text{Eq.26})$$

La forza di resistenza che agisce sulla sonda infatti è direttamente proporzionale all'accelerazione e ne condivide direzione e verso, con costante di proporzionalità data dalla sua massa.

La massa di Cassini non è costante ma varia nel tempo: al momento del lancio era di oltre 5600 kg (massa a vuoto e carburante), con attivarsi dei propulsori per il controllo di assetto e le manovre orbitali, il carburante si è consumato provocando una diminuzione della massa.

Al momento di E3 la massa stimata era di 2510 kg, al momento di E9 2377 kg e al momento di E19 2311 kg.

Trovata l'accelerazione con eq.27 , si può calcolare il  $\Delta V$  integrando l'accelerazione e considerando il  $\Delta V$  manovra impulsiva.

$$\vec{a}(t) = \frac{D(t)}{m(t)} \quad (\text{Eq. 27})$$

Per integrare l'accelerazione è stata utilizzata la funzione di Matlab  $\text{trapz}(t, \vec{a})$  che sfrutta il metodo dei trapezi.

Sia il  $\Delta V$  calcolato coi modelli di densità, sia quello riportato in [34] hanno un'incertezza che si deve tenere in considerazione per verificare che i due valori siano compatibili.

La compatibilità tra le due stime si ottiene tramite il metodo della *null hypothesis*: si testa l'ipotesi che la differenza tra le due misure sia zero, valutando la probabilità che la reale differenza misurata sia solo frutto del caso. Solitamente, l'ipotesi viene rigettata (e quindi le due misure non sono considerate compatibili) se tale probabilità è minore del 5%.

Supponendo che i due valori  $\Delta V_1 = \Delta V_{i\text{-esimo modello}}$  con  $i = 1, 2$  e  $\Delta V_2 = \Delta V_{\text{less 2014}}$  siano indipendenti e che siano gaussiane con deviazione standard  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , la loro differenza è una variabile random gaussiana di deviazione standard  $\sigma_3$ :

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (\text{Eq.28})$$

La probabilità P che  $\Delta V_1$  e  $\Delta V_2$  siano compatibili corrisponde alla probabilità che la loro differenza, in valore assoluto, sia maggiore del valore assoluto della differenza misurata  $\Delta$ .

$$P(\Delta V_1 \text{ compatibile con } \Delta V_2) = 1 - P(-\Delta \leq \Delta V_1 - \Delta V_2 \leq +\Delta) = 1 - \int_{-\Delta}^{+\Delta} PDF(x) dx = 1 - CDF(+\Delta) + CDF(-\Delta) \quad (\text{Eq.29})$$

PDF(x) (*probability density function*) è la funzione di densità di probabilità e descrive quanto è densa la probabilità di ogni punto dello spazio campionario (insieme dei possibili risultati di un esperimento casuale).

CDF(a) (*cumulative distribution function*) è la funzione di ripartizione e descrive la probabilità che la variabile assuma un

valore minore o uguale ad a.

In Matlab viene utilizzata la seguente formula (Eq.30):

$$P = 1 - cdf('Normal', delta, 0, sigma3) \\ \mp cdf('Normal', -delta, 0, sigma3)$$

Con  $delta = \Delta = \Delta V_1 - \Delta V_2$  (Eq. 31) e  $sigma3 = \sigma_3$ .

Cdf è una funzione di Matlab che dà come risultato il valore della CDF per diversi tipi di distribuzioni di probabilità, tra cui quella normale (Gaussiana), univocamente definita da media (posta a zero) e dalla deviazione standard.

$\sigma_1$  è stata calcolata utilizzando le simulazioni Monte Carlo. Per ogni parametro del modello viene creato un vettore random e per ogni elemento di questi vettori, per ogni istante di tempo della traiettoria di Cassini viene calcolata la densità. Viene ottenuta una matrice LxN in cui L è il numero di istanti di tempo, mentre N è il numero di elementi di ciascun vettore. Per ogni colonna, che rappresenta la densità in funzione del tempo ad una data realizzazione dei parametri del modello, viene calcolato il  $\Delta V$ , che risulta essere un vettore 1xN. E' possibile quindi calcolarne la media ( $\Delta V_{1mean}$ ) e la deviazione standard ( $\sigma_1$ ).  $\sigma_2$  è invece annotata in [34] ed ha un valore differente per E9 ed E19.

Di seguito sono riportati i passaggi principali che hanno permesso di ottenere la probabilità di compatibilità dei  $\Delta V$  calcolati coi modelli di densità e quelli riportati in [34]. Sono state utilizzate le equazioni 33,34,35.

## **E9: modello 1**

$$\Delta V_{1mean} = 0.31745 \text{ mm/s}$$

$$\Delta V_2 = 0.2466 \text{ mm/s}$$

$$\Delta = 0.31745 - 0.2466 = 0.07085 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_1 = 0.096895 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_2 = 0.0531 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_3 = 0.11049 \text{ mm/s}$$

$$P = 0.5214$$

### **E9: modello 2**

$$\Delta V_{1mean} = 0.30912 \text{ mm/s}$$

$$\Delta V_2 = 0.2466 \text{ mm/s}$$

$$\Delta = 0.30912 - 0.2466 = 0.06252 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_1 = 0.031823 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_2 = 0.0531 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_3 = 0.0619 \text{ mm/s}$$

$$P = 0.3125$$

### **E19: modello 1**

$$\Delta V_{1mean} = 0.092344 \text{ mm/s}$$

$$\Delta V_2 = 0.2563 \text{ mm/s}$$

$$\Delta = 0.092344 - 0.2563 = 0.163946 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_1 = 0.028834 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_2 = 0.049 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_3 = 0.0568 \text{ mm/s}$$

$$P = 0.0039$$

### **E19: modello 2**

$$\Delta V_{1mean} = 0.35577 \text{ mm/s}$$

$$\Delta V_2 = 0.2563 \text{ mm/s}$$

$$\Delta = 0.35577 - 0.2563 = 0.0995 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_1 = 0.037905 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_2 = 0.049 \text{ mm/s}$$

$$\sigma_3 = 0.0619 \text{ mm/s}$$

$$P = 0.1084$$

Considerando che non si è a conoscenza delle reali incertezze sui parametri dei modelli n.1 e n.2, i risultati sono buoni.

Sono inoltre riportati in *figura 6.1* e *figura 6.2* i  $\Delta V$  con le rispettive incertezze dei modelli esaminati.

Notiamo che per E9 entrambi i modelli forniscono risultati accettabili, mentre per E19 il modello n.1 non è soddisfacente. Questo modello infatti porta a sottostimare la resistenza aerodinamica e quindi il  $\Delta V$  rispetto al secondo, che invece dà risultati migliori nonostante fosse stato inizialmente realizzato per E3.

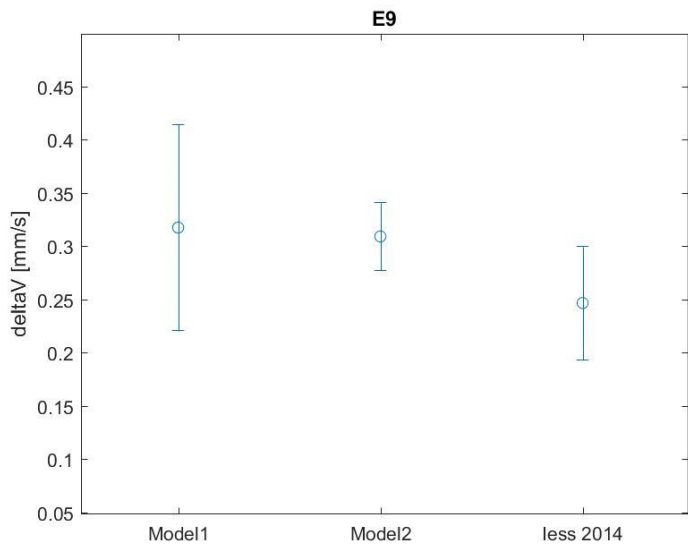


Fig. 6.1

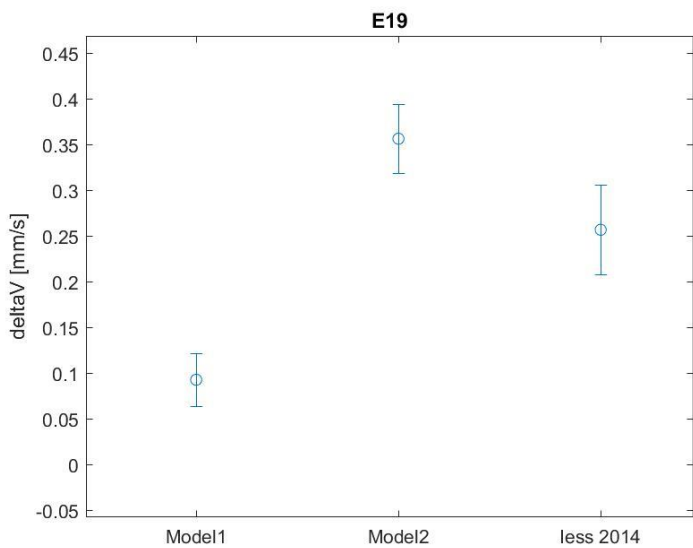


Fig.6.2



## Conclusioni

In questa tesi si è voluta calcolare la variazione di velocità della sonda Cassini dovuta all'influenza dei getti di vapore acqueo e ghiaccio eruttati dalle fratture sulla superficie di Encelado e la compatibilità di questi valori con quelli già stimati a partire da tecniche di determinazione orbitale facenti uso di osservabili radiometriche [34].

Il  $\Delta V$  per entrambi i flyby si aggira intorno ai 0.25 mm/s, un valore che potrebbe sembrare irrilevante, ma che è sufficiente a modificare in modo non trascurabile il moto della sonda lungo l'orbita. Le probabilità di compatibilità sono buone, anche se per poter fare uno studio più approfondito e preciso sarebbe necessario avere a disposizione direttamente i dati di telemetria della sonda Cassini in modo da poterli analizzare e creare un modello ex novo.

I risultati finali sono sicuramente migliorabili perché per la loro determinazione sono state necessarie diverse semplificazioni, come ad esempio l'uso di due modelli di densità che considerano soltanto poche sorgenti e non tutte e cento quelle presenti nelle tiger stripes. Si potrebbe quindi tenere conto di ciascun getto in modo differenziato, a seconda della sua intensità e della variazione della sua attività nel tempo. Come già rimarcato, quest'ultima è strettamente legata alle maree, che dipendono dalla differente distanza di Encelado da Saturno lungo la sua orbita ellittica: un approfondimento di questo collegamento porterebbe

sicuramente ad incrementare l'accuratezza delle previsioni. E' molto probabile che ricerche future svolte in questi ambiti diano luogo a nuovi modelli più precisi, che potrebbero portare a valori di densità anche molto diversi da quelli ottenuti.

L'analisi Monte Carlo ha inoltre sottolineato una incertezza che non può essere trascurata: anche in questo caso studi approfonditi potrebbero aiutare a diminuire l'errore che è manifesto soprattutto nei grafici presenti nel capitolo 6.

Encelado si è rivelato essere uno dei corpi più interessanti del Sistema Solare, soprattutto per gli astrobiologi che sono alla ricerca di vita extraterrestre. Non è quindi escluso che nei prossimi decenni una nuova sonda possa trovarsi ad essere disturbata dai suoi geysers come la sua antenata Cassini. Una parte della missione sarebbe dedicata senza dubbio all'approfondimento della comprensione di questi rari fenomeni criovulcanici e sicuramente non mancherebbero le scoperte strabilianti.

## **Bibliografia e Sitografia**

[1] F. Nimmo, C. Porco: “Enceladus”, Encyclopedia of the Solar System, 2014

[2] S.K. Yeoh , Z. Li, D.B. Goldstein, P.L. Varghese, D.A. Levin, L.M. Trafton: “ Constraining the Enceladus plume using numerical simulation and Cassini data”, 2016

[3] J.N. Spitale, T.A. Hurford, A.R. Rhoden, E.E. Berkson, S.S. Platt: “Curtain eruptions from Enceladus’ south-polar terrain”, Nature, 2015

[4] C. Porco, F. Nimmo, D. DiNino: “How the geysers, tidal stresses, and thermal emission across the south polar terrain of Enceladus are related”, 2014

[5] B.R. Smith-Konter, R.T. Pappalardo: “Tidal driven stress accumulation and shear failure of Enceladus’s tiger stripes”, 2008

[6] J. Brown, E. Wang, J. Hernandez, A.Y. Lee: “Importance of Model Simulations in Cassini In-flight Mission Events”, 2009

[7] A.P. Ingersoll, S.P. Ewald: “Total particulate mass in Enceladus plumes and mass of Saturn’s E ring inferred from Cassini ISS images”, 2011

- [8] A.Y. Lee, E.K. Wang, E.B. Pilinski, G.A. Macala, A. Feldman: “Estimation and Modeling of Enceladus Plume Jet Density Using Reaction Wheel Control Data”, JPL California
- [9] A.Y. Lee, E.K. Wang: “Estimation of Enceladus Plume Density Using Cassini Flight Data”, JPL California
- [10] T.S. Brown: “The Cassini Reaction Wheels: Drag and Spin-Rate Trends from an Aging Interplanetary Spacecraft at Saturn”, JPL California, 2016
- [11] S. Sarani: ”Enceladus Plume Density Modeling and Reconstruction for Cassini Attitude Control System”, JPL California, 2010
- [12] P. Helfenstein, P. C. Thomas, J. Veverka, J. Rathbun, J. Perry, E. Turtle, T. Denk, G. Neukum, T. Roatsch, R. Wagner, B.Giese, S. Squyres, J. Burns, A. McEwen, C. Porco, TV. Johnson: “Patterns of fracture and tectonic convergence near the south pole of Enceladus”, 2006
- [13] D. L. Matson, J. C. Castillo<sup>1</sup>, C. Sotin, T. V. Johnson, J. I. Lunine, A. G. Davies, T. B. McCord, P. C. Thomas, E. P. Turtle : “Enceladus interior and geysers – possibilità for hydrothermal geochemistry and N<sub>2</sub> production”, 2006
- [14] C.R. Glein, J. A. Baross, J.H. Waite Jr: “The chemistry of Enceladus’ ocean from a convergence of Cassini data and theoretical geochemistry”, 2015
- [15] M. E. Perry, B.D. Teolis<sup>2</sup>, J.Grimes<sup>2</sup>, G.P. Miller<sup>2</sup>, D.M. Hurley, J.H Waite, Jr., R.S. Perryman, R.L. McNutt Jr: “Direct measurement of the velocity of the Enceladus vapor plumes”, 2016

- [16] J. R. Spencer, C. J. A. Howett, A. Verbiscer, T. A. Hurford, M. Segura, D. C. Spencer: “Enceladus Heat Flow from High Spatial Resolution Thermal Emission Observations”, 2013  
S. Kamata, F. Nimmo: “Interior thermal state of Enceladus from the viscoelastic state of its icy shell”, 2016
- [17] C. J. Hansen, D. E. Shemansky, L. W. Esposito, A. I. F. Stewart, B. R. Lewis, J. E. Colwell, A. R. Hendrix, R. A. West, J. H. Waite Jr., B. Teolis, B. A. Magee : “The composition and structure of the Enceladus plume”, 2011
- [18] B. D. Teolis, M. E. Perry, B. A. Magee, J. Westlake, J. H. Waite: “Detection and measurement of ice grains and gas distribution in the Enceladus plume by Cassini’s Ion Neutral Mass Spectrometer”, 2010
- [19] J. Saur, N. Schilling, F.M. Neubauer, D.F. Strobel, S. Simon, M. K. Dougherty, C.T. Russell, R.T. Pappalardo: “Evidence for temporal variability of Enceladus’ gas jets: Modeling of Cassini observations”, 2008
- [20] V. Tennishev, M. R. Combi, B. D. Teolis, J. H. Waite: “An approach to numerical simulation of the gas distribution in the atmosphere of Enceladus”, 2010
- [21] G. H. Jones, C. S. Arridge, A. J. Coates, G. R. Lewis, S. Kanani, A. Wellbrock, D. T. Young, F. J. Crary, R. L. Tokar, R. J. Wilson, T. W. Hill, R. E. Johnson, D. G. Mitchell, J. Schmidt, S. Kempf, U. Beckmann, C. T. Russell, Y. D. Jia, M. K. Dougherty, J. H. Waite Jr., B. A. Magee: “Fine jet structure of electrically charged grains in Enceladus’ plume”, 2009
- [22] Candice J. Hansen, L. Esposito, A. I. F. Stewart, J. Colwell, A. Hendrix, W. Pryor, D. Shemansky, R. West: “Enceladus’ Water Vapor Plume”, Science, 2006

- [23] J.R. Spencer, F. Nimmo: “Enceladus: An Active IceWorld in the Saturn System”, 2013
- [24] M.E. Perry , B.D. Teolis , D.M. Hurley, B.A. Magee, J.H. Waite, T.G. Brockwell, R.S. Perryman, R.L. McNutt Jr.: “Cassini INMS measurements of Enceladus plume density”, *Icarus*, 2015
- [25] S. Sarani: “A Flight-Calibrated Methodology for Determination of Cassini Thruster On-Times for Reaction Wheel Biases”, JPL California, 2010
- [26] J.N. Spitale, C. Porco: “Association of the jets of Enceladus with the warmest regions on its south-polar fractures”, *Nature*, 2007
- [27] G.C. Collins, J.C. Goodman: “Enceladus’ south polar sea”, 2007
- [28] T. A. Hurford, P. Helfenstein, G. V. Hoppa, R. Greenberg, B. G. Bills: “Eruptions arising from tidally controlled periodic openings of rifts on Enceladus”, *Nature*, 2007
- [29] J. Saur, N.Schilling, F.M. Neubauer, D.F Strobel, S.Simon, M.K Dougherty, C.T. Russel, R.T Pappalardo: “Evidence for temporal variability in Enceladus’ gas jets: modeling of Cassini observation”, American Geophysical Union, 2008.
- [30] J.R. Spencer, A.C Barr, L.W. Esposito, P. Helfenstein, A.P. Ingersoll, R. Jaumann, C.P. McKay, F. Nimmo, J.H. Waite: “Enceladus: an active cryovolcanic satellite”, 2009
- [31] M. Beunkova, O. Soucek, J.Hron, O.Cadek: “Plume activity and tidal deformation on Enceladus influenced by faults and variable ice shell thickness”, *Astrobiology*, 2017

- [32] O.Abramov, J.R. Spencer: “Endogenic heat from Enceladus’ south polar fractures: new observation and models of conductive surface heating”, *Icarus*, 2008.
- [33] M.M. Hedmann, C.M. Gosmeyer, P.D. Nicholson, C.Sotin, R.H. Brown, R.N. Clark, K.H. Baines, B.J. Buratti, M.R. Showalter: “An observed correlation between plume activity and tidal stresses on Enceladus”, *Nature*, 2013
- [34] L.Iess, D.J. Stevenson, D.Hemingway, R.A. Jacobson, J.I Lunine, F.Nimmo, J.W.Armstrong, S.W. Asmar, M.Ducci, P.Tortora: “The gravity field and interior structure of Enceladus”, *Science*, 2014.
- [35] F.Postberg, J.Schmidt, J.Hiller, S.Kempf, S.Srama: “A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus”, *Nature*.
- [36] D.R. Stegaman, J.Freeman, D.A. May : “Origin of ice diapirism, true polar wander, subsurface ocean and tiger striper of Enceladus driven by compositional convention”, *Icarus*, 2009.
- [37] B.J Travis, G.Schubert: “Keeping Enceladus warm”, *Icarus*, 2015.
- [38] M.M. Hedman. P.D. Nicholson, M.R.Showalter, R.H. Brown, B.J. Buratti, R.N.Clark: “ Spectral observations of the Enceladus’ plume with Cassini VIMS”, 2009.
- [39] A.Y. Lee, E.K.Wang: “Estimation and modeling of Enceladus plume jet density using Cassini flight data”, *Journal of spacecrafts and rockets*, 2013.
- [40] B.D Teolis, M.E. Perry, B.A. Magee, J.Westlake, H.Waite: “Detection and measurement of ice grains and gas distribution in the enceladus plume by Cassini’s Ione Neutral mass spectrometer”, *Journal of geophysical research*, 2010.

[41] B.D Teolis, M.E. Perry, C.Hansen, J.H. Waite, C.Porco, J.R.Spencer, C.J.A. Howett: “Enceladus plume structure and time variability: comparison of Cassini observations”, *Astrobiology*, 2017.

[42] Bertotti: “Physics of the Solar System”, 2003.

[43] <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>



## **Ringraziamenti**

Non ci posso ancora credere di essere arrivata alla fine di questo percorso iniziato tre anni fa. Se si chiedesse ai miei genitori che cosa rispondeva quando in seconda elementare mi chiedevano che cosa volessi fare da grande, loro direbbero sicuramente “Voglio studiare lo spazio!”. I momenti trascorsi dal giorno in cui ho deciso che quello sarebbe stato il mio sogno, sono stati un susseguirsi di prove da superare, ostacoli, successi, cadute, pianti, risate. Essere riuscita ad entrare nella scuola che volevo, aver avuto l’opportunità di imparare così tante cose ed essere arrivata finalmente alla laurea è per me una gioia immensa.

Vorrei ringraziare i professori Paolo Tortora e Marco Zannoni, per avermi permesso di occuparmi di un argomento che potesse conciliare la mia passione per l’astronomia con l’ingegneria aerospaziale e per la pazienza e la disponibilità dimostrate nell’accompagnarmi nella creazione della tesi.

Grazie anche a tutti i ragazzi del Tecnopolo, che mi hanno fatta sentire subito a mio agio e mi hanno aiutata nonostante dovessero svolgere il loro lavoro.

Un pensiero speciale va ai miei compagni di corso Edoardo, Lorenzo, Matteo, Tommaso: con la loro compagnia questi tre anni sono stati più leggeri. A Dodi in particolare devo metà dei miei successi negli esami, senza di lui nulla sarebbe stato possibile.

Non posso non ricordare le mie grandi amiche, sempre pronte a farmi ridere nei momenti di sconforto, a costringermi ad uscire anche nei momenti di pazzia pre-esami e a fingere interesse mentre raccontavo aneddoti sul mondo dell’aviazione, il vostro

sostegno è stato davvero importante.

Sono stati fondamentali i miei amici di ballo, senza i quali nell'ultimo periodo sarei sicuramente impazzita, grazie di tutto.

Ricordo anche coloro che non hanno creduto in me, che mi hanno messo i bastoni tra le ruote, che mi hanno creduto spacciata quando ero in difficoltà. Grazie anche a loro, perché proprio per dimostrarli la mia vera passione non mi sono mai arresa, questa è la mia rivincita.

Il grazie più grande va però a mio babbo, mia mamma e mio fratello: mi hanno sostenuta ogni giorno e mi hanno spinto a dare il massimo. Hanno sopportato le mie urla, i fogli sparsi dappertutto, le battute nerd che a volte non riesco proprio a trattenere. Sono loro che più di tutti mi hanno tenuta incollata al mio sogno non permettendomi neanche per un secondo di pensare che non ne fossi all'altezza.

Gli voglio così tanto bene. Con loro al mio fianco il cielo è più limpido e si riescono a vedere le stelle.

