



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Analisi comparata del plasma presso Miranda e Umbriel tramite i dati di Voyager 2

Tesi di Laurea in
ING-IND/05: Fondamenti di Meccanica Orbitale

Relatore

Prof. Marco Zannoni

Presentata da

Thomas Leante

Correlatore

Dott. Giuliano Vinci

Sessione: Dicembre 2025

Anno Accademico 2024/2025

Abstract

Il presente lavoro di tesi propone una rianalisi dei dati raccolti dall'esperimento Plasma Science (PLS) a bordo di Voyager 2 durante il sorvolo di Urano del gennaio 1986, con l'obiettivo di indagare le dinamiche di interazione tra il plasma magnetosferico e i satelliti interni Miranda e Umbriel.

L'indagine è stata condotta sviluppando una pipeline in Python che, integrando le librerie `Speasy` per l'accesso ai database AMDA e `SpiceyPy` per i kernel SPICE, ha consentito di correlare le misure di densità, velocità e temperatura con la traiettoria della sonda nel sistema di riferimento IAU URANUS. Applicando tecniche di fitting numerico multi-componente al profilo radiale di densità elettronica, analizzato separatamente per le popolazioni calde e fredde nelle fasi di inbound e outbound, è stato possibile isolare variazioni locali potenzialmente associate alla presenza dei satelliti. I risultati indicano modalità di interazione differenziate per i due corpi. Per Miranda, le osservazioni suggeriscono una struttura di scia complessa, con segni di compressione del flusso a monte e riempimento dinamico a valle, coerenti con un ruolo da spazzino del satellite nella modulazione locale del plasma. Nel caso di Umbriel, non emerge una deplezione stabile o geometrica; le fluttuazioni di densità osservate appaiono più compatibili con dinamiche globali della magnetosfera, come trasporto e iniezioni stocastiche, che possono mascherare gli effetti locali. Pur riconoscendo i limiti spaziali e temporali del dataset storico, lo studio fornisce una caratterizzazione aggiornata del plasma uraniano e dimostra come metodologie moderne possano valorizzare l'eredità scientifica di Voyager 2.

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia sincera gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro di tesi.

In primo luogo, ringrazio il Prof. Marco Zannoni, relatore della tesi, per avermi dato l'opportunità di sviluppare questo lavoro e di approfondire tematiche legate all'esplorazione planetaria, un ambito di grande interesse personale e scientifico.

Un ringraziamento particolare va anche al Dott. Giuliano Vinci, co-relatore. Il suo supporto costante e le discussioni stimolanti sono stati determinanti per la maturazione delle idee e per l'approfondimento dei contenuti scientifici.

Esprimo infine la mia riconoscenza ai docenti del corso di Ingegneria Aerospaziale, il cui insegnamento è stato fondamentale per acquisire le competenze necessarie alla realizzazione di questo lavoro.

Indice

1	Prologo: L'Eredità della Ricerca	1
2	La Scoperta di Urano	3
2.1	Resoconto di una Cometa	3
2.2	Urano: L'Istituzione del Settimo Pianeta	4
2.3	I Corpi Minori di Urano: Storia delle Scoperte tra Satelliti e Anelli .	5
2.3.1	La Scoperta delle Lune	6
2.3.2	La Scoperta degli Anelli	6
3	La Missione Voyager	9
3.1	Il Jet Propulsion Laboratory	9
3.2	La Fionda Gravitazionale e la Proposta del "Grand Tour"	10
3.3	Voyager: La Nascita della Missione	11
3.4	Definizione degli Obiettivi: Il Percorso verso lo Spazio Interstellare .	11
3.5	La Partenza	12
3.6	Il Payload Scientifico della Voyager 2	13
3.7	L'Esperimento di Scienza del Plasma: il PLS	15
3.7.1	Descrizione dell'Apparato	15
3.7.2	Gli Obiettivi Scientifici	16
3.8	Il Viaggio e L'Incontro con Urano	16
3.9	Le Scoperte di Voyager 2	17
3.9.1	Atmosfera e Dinamica Planetaria	17
3.9.2	Gli Anelli	18
3.9.3	Le Lune	18
3.9.4	La Magnetosfera	18
3.10	L'Eredità della Missione Voyager	19
4	Metodologia e Acquisizione Dati	21
4.1	Contesto Scientifico e Motivazioni	21
4.2	Obiettivi del Lavoro di Tesi	22
4.3	Dataset e Strumenti di Analisi	22
4.4	Estrazione e pre-elaborazione dei dati	23
4.5	Integrazione con i dati orbitali SPICE	23

5	Analisi e Discussione dei Risultati	25
5.1	Rappresentazione Spaziale dei Dati Plasmatici	25
5.1.1	Profilo di Densità Radiale	25
5.1.2	Metodologia Dell'Analisi Tridimensionale	27
5.1.3	La Traiettoria di Voyager 2	28
5.1.4	Mappe Spaziali dei Parametri Plasmatici	29
5.1.5	Morfologia del Plasma Elettronico	29
5.1.6	Morfologia del Plasma Ionico	34
5.1.7	Analisi Termica della Popolazione Elettronica	37
5.2	Analisi delle Variazioni di Densità tramite Fitting Numerico	41
5.2.1	Metodologia del Fitting	42
5.3	Traiettoria di Inbound: Presentazione dei Risultati	45
5.3.1	Popolazione Calda	46
5.3.2	Popolazione Fredda	51
5.4	Traiettoria di Outbound: Presentazione dei Risultati	55
5.4.1	Popolazione Calda	55
5.4.2	Popolazione Fredda	62
5.5	Risultati dell'Elaborazione e Confronto con la Letteratura	73
6	Conclusione	75
6.1	Sintesi dei Risultati Principali	75
6.2	Limiti ed Incertezze del Lavoro	76
6.3	Prospettive Future e Conclusioni Finali	77

Elenco delle figure

3.1	Schema Rappresentativo di Voyager 2	13
5.1	Profilo di Densità Radiale	26
5.2	Esempio di grafico: Meridian Chart	27
5.3	Esempio di grafico: Longitude Chart	28
5.4	Traiettoria di Voyager 2 durante il flyby di Urano	28
5.5	Densità Elettronica	30
5.6	Densità Elettronica con Lune	32
5.7	Densità Ionica	34
5.8	Densità Ionica con Lune	36
5.9	Temperatura Elettronica	38
5.10	Temperatura Elettronica con Lune	40
5.11	Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Inbound Hot . .	46
5.12	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Inbound Hot	47
5.13	Profilo Radiale di Densità intorno a Umbriel: Caso Inbound	49
5.14	Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Inbound Cold .	51
5.15	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Inbound Cold	53
5.16	Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Outbound Hot .	55
5.17	Fit Alternativo del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Outbound Hot	57
5.18	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Outbound Hot	58
5.19	Profilo Radiale di Densità intorno a Umbriel: Caso Outbound Hot .	60
5.20	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Umbriel: Caso Outbound Hot	61
5.21	Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Outbound Cold	63
5.22	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Outbound Cold	65
5.23	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Miranda: Caso Alternativo Outbound Cold	68
5.24	Profilo Radiale di Densità intorno a Umbriel: Caso Outbound Cold .	69
5.25	Fit del Profilo Radiale di Densità intorno a Umbriel: Caso Outbound Cold	71

Elenco delle tabelle

5.1	Risultati dei test di normalità	43
5.2	Miranda Hot Inbound: Parametri del Fit	47
5.3	Risultati dell'analisi statistica inerenti il profilo di densità elettronica nella regione hot inbound di Umbriel	50
5.4	Miranda Cold Inbound: Parametri del Fit	53
5.5	Miranda Hot Outbound: Parametri del Fit	57
5.6	Miranda Hot Outbound: Parametri del Fit	58
5.7	Umbriel Hot Outbound: Parametri del Fit	61
5.8	Miranda Cold Outbound: Parametri del Fit	65
5.9	Miranda Cold Outbound: Parametri del Fit Alternativo	68
5.10	Umbriel Cold Outbound: Parametri del Fit	71

Acronimi

JPL	Jet Propulsion Laboratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration
DSN	Deep Space Network
MJS	Mariner Jupiter-Saturn
SSG	Science Steering Group
RTG	Radioisotope Thermo Electric Generator
HGA	High Gain Antenna
AACS	Attitude and Articulation Control System
CCS	Computer Command Subsystem
FDS	Flight Data Subsystem
ISS	Imaging Science System
IRIS	Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer
UVS	Ultraviolet Spectrometer
PPS	Photopolimeter System
MAG	Triaxial Fluxgate Magnetometer
PLS	Plasma Spectrometer
LECP	Low Energy Charged Particle Instrument
CRS	Cosmic Ray System
PWS	Plasma Wave Subsystem
PRA	Planetary Radio Astronomy Investigation
RRS	Radio Science System

Capitolo 1

Prologo: L'Eredità della Ricerca

C'è un filo invisibile che unisce l'occhio attento di un uomo che fissa un oculare nel Settecento alla traiettoria calcolata di una sonda spaziale interplanetaria nel Novecento. È il filo della curiosità ostinata, quella che trasforma l'anomalia in scoperta e il confine in meta da superare.

Quando Sir William Herschel, con il suo meticoloso lavoro di mappatura celeste, identificò nel 1781 un oggetto con un moto proprio oltre l'orbita di Saturno, egli non stava semplicemente aggiungendo una nuova voce a un catalogo astronomico; stava, senza nemmeno rendersene conto, lanciando un'eredità. La sua scoperta avrebbe posto le basi per nuovi interrogativi, ai quali le generazioni future avrebbero voluto e sentito il dovere di rispondere. Quel puntino di luce sfocato e ambiguo visto dall'uomo divenne con il tempo un monito e un'invocazione: un nuovo confine del Sistema Solare che attendeva di essere compreso ed esplorato.

Oltre un secolo e mezzo dopo, la sonda Voyager 2 è stata la nostra risposta più eloquente a tale richiamo. Il suo fugace flyby del 1986 non fu solo un trionfo dell'ingegneria, ma il compimento simbolico di un'impresa iniziata con un telescopio artigianale. Tale risposta, tuttavia, per quanto grandiosa, non esaurì pienamente la complessità del pianeta. Come spesso accade nell'ambito scientifico, ogni nuova misura, ogni immagine, ogni dato porta con sé anche nuove incertezze, finendo per ampliare il numero degli interrogativi aperti. Con il passare del tempo e l'avanzamento degli studi, dunque, Urano si è rivelato essere un enigma ancora più ricco ed interessante, capace di mettere in discussione modelli accreditati e introducendo nel dibattito temi innovativi degni di attenzione.

Questo lavoro si colloca consapevolmente in quel solco di continuità, mirando a offrire un contributo, seppur minimo, al progresso degli studi su questo enigmatico gigante di ghiaccio e alla comprensione del suo ambiente spaziale. Per dare il giusto valore alla nostra attuale conoscenza, è necessario tornare all'origine: al giorno esatto in cui quell'enigma cosmico fu per la prima volta tirato fuori dall'ombra e registrato nelle mappe del cielo.

Capitolo 2

La Scoperta di Urano

"Martedì 13 marzo, tra le dieci e le undici di sera, mentre stavo esaminando le piccole stelle nei dintorni di H Geminorum, ne notai una che appariva visibilmente più grande delle altre: colpito dalla sua insolita grandezza, la confrontai con H Geminorum e con la piccola stella nel quartile tra l'Auriga e i Gemelli, e constatando che era molto più grande di entrambe, sospettai si trattasse di una cometa." [1]

Così inizia il resoconto di William Herschel sulla sua scoperta del settimo pianeta del Sistema Solare. Una scoperta accidentale, inizialmente fraintesa, ma che portò gli astronomi del tempo a ridefinire totalmente i confini del Sistema Solare.

Anche se teoricamente osservabile ad occhio nudo, infatti, Urano rimase per molto tempo sconosciuto agli osservatori del passato. Il suo lento movimento, a confronto degli altri pianeti allora noti, e la sua ridotta luminosità ne ostacolarono a lungo l'identificazione, facendolo confondere tra le moltitudine di stelle osservabili nel cielo notturno [2]. Prima che la sua natura planetaria fosse scientificamente e formalmente riconosciuta, diversi astronomi guardarono ad Urano come ad un fioco astro senza carpirne la sua vera natura. È il caso di John Flamsteed, ad esempio, che già nel 1690 incluse erroneamente Urano nel suo catalogo stellare con il nome di *34 Tauri*, non riconoscendone le proprietà planetarie [3].

L'analisi del dilettante astronomo inglese William Herschel, invece, seguì un andamento diverso.

2.1 Resoconto di una Cometa

Spinto dal desiderio di tracciare una mappa completa della volta celeste, Herschel aveva già portato a compimento un accurato censimento di tutte le stelle fino alla magnitudine 4 e lavorava a un progetto ancor più ambizioso: catalogare gli astri più luminosi fino alla magnitudine 8. Urano, con una magnitudine apparente pari a 6, rientrava quindi pienamente nel campo di osservazione da lui definito, rappresentando uno degli oggetti celesti più luminosi sottoposti al suo scrutinio [4].

La sera del 13 marzo 1781, Herschel installò nel giardino della propria abitazione un nuovo telescopio riflettore da lui stesso progettato e costruito, dotato di un'apertura di 6.2 pollici e di una lunghezza focale di 7 piedi. Nel diario dell'astronomo, a quella data, compare un'annotazione destinata a entrare nella storia:

"Martedì 13 marzo. Nel quartile vicino a ζ Tauri, la più bassa delle due è una curiosa stella nebulosa o forse una cometa. Una piccola stella segue la cometa a $2/3$ della distanza del campo." [5]

La successiva menzione dell'oggetto "nebuloso" risale a quattro notti dopo, il 17 marzo:

"Ho cercato la cometa o stella nebulosa e ho scoperto che è una cometa, perché ha cambiato posizione." [5]

Un esame approfondito delle sue procedure osservative suggerisce tuttavia che Herschel avesse già intuito la natura non stellare dell'oggetto fin dal primo avvistamento. Nella sua comunicazione ufficiale alla Royal Society, egli descrisse accuratamente il metodo utilizzato per discriminare l'oggetto dalle stelle fisse. Impegnato in studi sulla parallasse stellare, disponeva di oculari a elevatissimo ingrandimento (da 227x a 2010x). Applicando all'oggetto potenze crescenti (fino a 932x), osservò che il suo diametro apparente aumentava proporzionalmente all'ingrandimento, in netto contrasto con quanto si verifica con le stelle fisse, il cui diametro percepito non si dilata in misura apprezzabile. Inoltre, mentre sottoposto a forti ingrandimenti l'oggetto appariva "sfocato e mal definito", contrariamente alle stelle circostanti che conservavano invece la loro consueta nitidezza e brillantezza. Tali elementi lo spinsero dunque a riconsiderare progressivamente l'ipotesi che potesse trattarsi di una stella [1]. Dopo averne accertato il moto, il 17 marzo Herschel comunicò la sua scoperta all'Astronomo Reale Nevil Maskelyne presso l'Osservatorio di Greenwich, definendola una cometa. La risposta di Maskelyne, datata 23 aprile, ebbe un ruolo decisivo per le implicazioni scientifiche che portava con sé. Pur ringraziando per la segnalazione, egli avanzò infatti l'ipotesi che l'oggetto potesse non essere una cometa, bensì un pianeta in orbita quasi circolare attorno al Sole, poiché non aveva rilevato tracce di chioma o coda, caratteristiche tipiche delle comete [6]. Il sospetto che si trattasse di un corpo planetario di tipo regolare sembrava dunque già piuttosto solido. A conferma di ciò, in una lettera inviata diciannove giorni prima a Sir William Watson – amico in comune con Herschel e figura di spicco della Royal Society e della Bath Philosophical Society – Maskelyne si era già riferito alla scoperta come a una "cometa o nuovo pianeta" [5]. Nonostante il crescente favore delle comunità astronomiche verso l'interpretazione planetaria, Herschel continuò inizialmente a descrivere l'oggetto come una cometa. Le sue misurazioni suggerivano infatti un incremento del diametro apparente, tipico delle comete quando si avvicinano al Sistema Solare interno. In una lettera indirizzata a Watson, l'astronomo mostrò un atteggiamento prudente nei confronti delle sue stesse conclusioni, affermando che i suoi strumenti fossero "mal adattati" al calcolo orbitale e che tale compito dovesse essere affidato a un "Osservatorio regolare", lasciandolo dunque a "mani più capaci" [1].

2.2 Urano: L'Istituzione del Settimo Pianeta

Il crescente convincimento della comunità astronomica riguardo alla natura planetaria dell'oggetto osservato da Herschel inaugurò una fase di analisi più strutturata e condivisa, finendo per coinvolgere importanti figure del panorama astronomico del

XVIII secolo.

Mentre Maskelyne figurava tra i sostenitori più decisi dell'ipotesi di un nuovo pianeta, altri colleghi preferirono inizialmente mantenere maggiore prudenza. Un contributo determinante giunse da Johann Elert Bode, di Berlino, che nel suo almanacco per il 1784 definì la scoperta un “evento astronomico eccezionale”, descrivendo l'oggetto come una “stella mobile” fino ad allora ignota, di natura planetaria e situata oltre l'orbita di Saturno [7]. Bode ricostruì con grande accuratezza il percorso osservato, constatando che esso risultava parallelo all'eclittica. Tale evidenza lo portò a sostenere che l'orbita fosse inequivocabilmente quella di un nuovo pianeta del Sistema Solare [7]. Le conferme esterne spinsero Herschel a condurre una serie di osservazioni più precise, distribuite nell'arco di dodici mesi, volte a monitorare l'evoluzione del diametro apparente dell'oggetto. Dai nuovi dati ricavati emerse che tale diametro non mostrava un incremento misurabile, stabilizzandosi su un valore medio di 4.18 secondi d'arco [5], molto prossimo a quello oggi accettato, pari a circa 3.8 secondi d'arco [8]. Questo fatto costituiva una prova inconfutabile a favore dell'interpretazione planetaria.

La progressiva convergenza della comunità scientifica sul riconoscimento del nuovo pianeta indusse Herschel stesso, nel 1783, a definirlo ufficialmente come un nuovo “[...] *Pianeta Primario del nostro Sistema Solare*” [5]. Il rilievo storico della scoperta gli valse il sostegno diretto della Corona britannica: Re Giorgio III gli conferì la Medaglia Copley della Royal Society e un appannaggio di 200 sterline annue. In questo clima di patrocinio reale, Herschel propose di denominare il nuovo corpo celeste *Georgium Sidus*, la “Stella di Giorgio”, in omaggio al sovrano [5]. Tale denominazione, tuttavia, benché impiegata per diversi decenni a seguire nelle pubblicazioni astronomiche britanniche [9], non incontrò mai analogo favore al di fuori del Regno Unito. Fu la proposta avanzata da Bode, “*Urano*”, a risultare più coerente, adattandosi meglio alla nomenclatura mitologica degli altri pianeti e ottenendo progressivamente un consenso sempre più ampio nella letteratura scientifica. La transizione terminò solo dopo la morte di Herschel, nel 1822, quando il nome *Urano* si affermò definitivamente come denominazione standard universalmente accertata. Il riconoscimento internazionale di Urano come nuovo pianeta non solo ampliò per la prima volta dopo l'antichità i confini del Sistema Solare conosciuto, ma pose le basi per ulteriori indagini che avrebbero rivelato ben presto la complessità di questo mondo remoto, inaugurando una nuova fase nella storia dell'astronomia moderna.

2.3 I Corpi Minori di Urano: Storia delle Scoperte tra Satelliti e Anelli

Consolidata la natura planetaria di Urano e la sua definitiva collocazione nel quadro del Sistema Solare, l'evoluzione delle conoscenze scientifiche si spostò progressivamente sulla caratterizzazione del suo sistema di corpi minori. Il percorso storico che condusse alla scoperta e allo studio dei satelliti e degli anelli uraniani si articola in tappe ben definite, ciascuna scandita dal progresso strumentale e dall'opera di astronomi distintisi nel corso di oltre due secoli.

2.3.1 La Scoperta delle Lune

La fase pionieristica fu inaugurata dallo stesso Sir William Herschel che, l'11 gennaio 1787, annunciò l'individuazione dei due satelliti principali, Titania e Oberon [5], il cui alone di osservabilità rimase appannaggio del suo strumento per quasi mezzo secolo [10]. Herschel non solo scoprì queste lune ma calcolò anche i loro periodi orbitali con una notevole accuratezza per l'epoca: 13.462 e 8.709 giorni rispettivamente, valori molto vicini a quelli attualmente accreditati (13.463237 per Oberon e 8.705869 per Titania [11]). Negli anni successivi alla scoperta l'astronomo inglese svolse ulteriori studi a riguardo arrivando ad ipotizzare l'esistenza di altri quattro satelliti: due esterni all'orbita di Oberon, uno tra le orbite di Oberon e Titania, e l'ultimo interno all'orbita di Titania [12]. L'esistenza dei tre satelliti più esterni [13], tuttavia, non fu mai confermata e a seguito di ricerche svoltesi nel corso degli anni le supposizioni di Herschel si rivelarono infondate.

Il merito di tali smentite va attribuito a William Lassell [14], un appassionato astronomo inglese la cui dedizione lo portò a eccellere nella costruzione di telescopi riflettori da 24 pollici. I suoi strumenti si distinguevano nello specifico per la loro capacità di respingere la luce diffusa in prossimità dei pianeti, una superiorità tecnologica che, dopo la scoperta di Tritone (satellite di Nettuno) nel 1846 [15], gli permise di intraprendere una nuova campagna osservativa su Urano e rivelare al mondo l'esistenza di due nuovi satelliti maggiori: Ariel e Umbriel [16].

Il quadro delle maggiori lune uraniane fu infine completato nel 1948, quando Gerard Kuiper identificò Miranda, il minore e l'ultimo dei satelliti maggiori dal profilo sferico. La scoperta, molto più recente rispetto alle precedenti, fu resa possibile dall'applicazione di avanzate tecniche fotografiche. Utilizzando il riflettore da 82 pollici dell'Osservatorio McDonald in Texas, Kuiper stava conducendo una campagna osservativa sui satelliti esterni di Urano quando, il 16 febbraio, immortalò un debole oggetto in prossimità del pianeta. L'analisi successiva, confermata da lastre di controllo ottenute il 1° marzo, esclude la possibilità che si trattasse di una stella di fondo e ne accertò la natura satellitare [17].

2.3.2 La Scoperta degli Anelli

Parallelamente, la ricostruzione della storia del sistema di anelli risulta ancora più frammentata. L'affermazione di Herschel nel 1789 di aver osservato un possibile anello fu a lungo considerata dubbia [12], sebbene la sua descrizione si allineasse a diverse proprietà dell'oggi noto anello ϵ [18]. Un successivo episodio di rilievo risale al 1924, quando Eugène Antoniadi, astronomo greco del XX secolo, riportò un'osservazione interpretata in seguito come illusione visiva [2]. A livello scientifico, tuttavia, la conferma inconfutabile dell'esistenza del sistema anulare si ebbe solo il 10 marzo 1977, quando James L. Elliot, Edward W. Dunham e Douglas J. Mink, analizzando l'occultazione della stella SAO 158687, interpretarono le brevi e ripetute attenuazioni della luce stellare come la prova inequivocabile dell'esistenza degli anelli [19].

Passo dopo passo, la caratterizzazione del sistema uraniano è emersa lentamente nel corso della storia a seguito del lavoro di osservazione di una moltitudine di astronomi ed esperti del settore. Il vero salto in avanti, però, lo si è compiuto solo in seguito all'avvento dell'esplorazione robotica. Il sorvolo della sonda Voyager 2 nel 1986,

gestito dal Jet Propulsion Laboratory (JPL), ha rappresentato il contributo fondamentale più significativo, non solo fornendo la prima osservazione diretta e risolutiva del complesso anulare, ma anche rivoluzionando la comprensione del sistema lunare con la scoperta e la conferma di dieci ulteriori satelliti interni [20].

Proprio per il suo carattere rivoluzionario, la missione Voyager non segna solo una semplice transizione tecnologica, ma diventa essa stessa un oggetto di studio fondamentale. Il capitolo successivo è quindi dedicato all'analisi della sua programmazione, delle sue strategie osservative e dei più significativi risultati raggiunti, ponendo al centro della disamina i dati dell'esperimento di scienza del plasma (PLS), soggetto principale di questo lavoro di tesi e la cui interpretazione si è rivelata fondamentale per caratterizzare la fisica del sistema uraniano.

Capitolo 3

La Missione Voyager

L'avvento dell'Era Spaziale segnò una discontinuità senza precedenti nell'esplorazione del cosmo, introducendo modalità di indagine fino a quel momento inimmaginabili. La comunità astronomica, da tempo consapevole delle intrinseche limitazioni delle osservazioni condotte da Terra — quali le distorsioni atmosferiche e le enormi distanze interplanetarie — iniziò a delineare le potenzialità di un paradigma radicalmente nuovo di rilevamento remoto. Fino a quel momento, il *remote sensing* si era configurato come una pratica in cui, malgrado i possibili sforzi, sia l'osservatore che la sua strumentazione condividevano la stessa posizione, remota rispetto al target osservato. La rivoluzione concettuale risiedette nell'innovativa possibilità di proiettare fisicamente la strumentazione scientifica nello spazio, inviando sonde automatizzate nelle immediate prossimità di mondi altrimenti lontani. Questo approccio permise di trasformare l'osservazione astronomica da una disciplina puramente passiva a una attiva, in cui la "vicinanza" divenne il parametro chiave per svelare la natura geologica, atmosferica e magnetica dei corpi celesti indagati. Fu in questo contesto di rinnovata fiducia nelle tecnologie spaziali che presero forma missioni ambiziose come quella del programma Voyager, progettate per sfruttare appieno questa nuova prospettiva di esplorazione in situ.

La concretizzazione di tali imprese richiedeva però non solo visione scientifica, ma anche capacità ingegneristiche d'avanguardia e un'organizzazione in grado di gestire complessità progettuali senza precedenti. Questo ruolo di coordinamento e innovazione tecnologica fu assunto con straordinario successo dal Jet Propulsion Laboratory (JPL) della NASA, l'istituto di ricerca californiano che divenne il cervello operativo e il cuore ingegneristico del programma Voyager.

3.1 Il Jet Propulsion Laboratory

Il Jet Propulsion Laboratory (JPL) di Pasadena, in California, rappresenta un pilastro fondamentale nell'esplorazione spaziale del XX secolo. Nato come laboratorio di ricerca missilistica presso il Caltech negli anni '30 sotto la guida di Theodore von Kármán, il JPL si è progressivamente evoluto da centro di sviluppo per la propulsione a reazione a principale centro operativo per le missioni spaziali robotiche della NASA. Un passaggio cruciale nella sua storia fu il trasferimento dalla giurisdizione militare a quella della neocostituita agenzia spaziale civile nel 1958, che ne indirizzò

definitivamente la missione verso l'esplorazione scientifica [21]. La competenza del JPL non si limitò alla progettazione di veicoli spaziali, ma si estese fino alla creazione di infrastrutture critiche come il Deep Space Network (DSN), una rete globale di antenne per le comunicazioni interplanetarie [22]. Questa capacità integrata di progettare, lanciare e gestire missioni complesse fu dimostrata, nel corso degli anni, da una serie di successi pionieristici: dal primo satellite americano Explorer 1 nel 1958, che scoprì le fasce di Van Allen [23], alle prime missioni planetarie come il Mariner 2 verso Venere (1962) e il Mariner 4 verso Marte (1964), fino agli allunaggi delle sonde Surveyor verificatisi fra il 1966 e il 1968. Questo portafoglio di competenze collaudate e questa cultura dell'innovazione posero le solide fondamenta sulle quali, negli anni successivi, sarebbero state costruite missioni ancor più ambiziose di esplorazione del sistema solare esterno, come ad esempio la missione Voyager.

3.2 La Fionda Gravitazionale e la Proposta del "Grand Tour"

Nel corso delle prime spedizioni interplanetarie, gli specialisti di navigazione del JPL osservarono un fenomeno dinamico fondamentale: il passaggio ravvicinato di un veicolo spaziale presso un pianeta ne alterava la velocità nel sistema di riferimento eliocentrico [24]. Questo effetto, noto come "fionda gravitazionale" (*gravity assist*), si verifica quando un veicolo spaziale, transitando sul lato del pianeta in allontanamento orbitale, ne sottrae una piccola quantità di energia, incrementando così la propria velocità relativa.

Nel 1966, Gary Flandro, scienziato del JPL e del Caltech, intuì le potenzialità strategiche di questa tecnica, dimostrando come un singolo veicolo spaziale potesse essere indirizzato verso molteplici pianeti esterni in successione, riducendo drasticamente i tempi di volo verso le regioni più remote del sistema solare. Flandro identificò in particolare la favorevole configurazione planetaria del 1978, che avrebbe reso possibile un "Grand Tour" Terra-Giove-Saturno-Urano-Nettuno, permettendo l'osservazione ravvicinata di tutti i giganti gassosi in un'unica missione [25].

L'entusiasmo scientifico per questa proposta fu immediato e condiviso. Due distinti studi della National Academy of Sciences ne sostenevano con vigore la realizzazione. Il primo, presieduto da James Van Allen, delineò i precisi obiettivi scientifici della missione, sottolineando come le risorse professionali e l'entusiasmo della comunità scientifica fossero pronti per un tale impegno [26]. Un secondo studio, guidato da F. S. Johnson, ribadì che l'esplorazione del sistema solare esterno rappresentava uno dei principali obiettivi scientifici del decennio, reso particolarmente allettante dalla rara opportunità di investigare più pianeti in un'unica missione con tecnologie già disponibili, raccomandando lo sviluppo di veicoli spaziali dedicati per una serie di quattro lanci alla fine degli anni '70 [27].

Sulla scia di questo consenso, tra il dicembre del 1969 e il gennaio del 1970 il JPL predispose una proposta formale per il programma Grand Tour che si sarebbe poi evoluta nella missione Voyager [28]. Il piano originale prevedeva il lancio di due veicoli spaziali nel 1976-77 diretti verso Giove, Saturno e Plutone, seguiti da altri due nel 1979 verso Giove, Urano e Nettuno. Sebbene il Congresso degli Stati Uniti avesse accolto con favore i piani del "Grand Tour", le ristrettezze fiscali dell'epoca

resero difficile il finanziamento dell'intero portfolio di proposte della NASA. Di fronte a questo limite economico, dunque, l'agenzia spaziale chiese al JPL di sviluppare una versione ridotta della missione in grado di preservare la maggior parte degli obiettivi scientifici del Grand Tour, ma a un costo complessivo significativamente inferiore [29].

3.3 Voyager: La Nascita della Missione

Il Jet Propulsion Laboratory presentò allora una proposta adatta al soddisfacimento delle principali limitazioni precedentemente espresse: la missione *Mariner Jupiter-Saturn* (MJS). Il progetto prevedeva l'impiego di due sonde spaziali inizialmente concepite specificamente per l'esplorazione scientifica dei due soli pianeti giganti, Giove e Saturno, senza gli obiettivi aggiuntivi di raggiungere Urano, Nettuno o Plutone. La progettazione dei veicoli spaziali fu orientata verso un'elevata affidabilità dei componenti, necessaria a garantire il successo operativo per l'intera durata della missione, stimata in quattro anni dal lancio fino all'incontro con Saturno. Dal punto di vista finanziario, questa soluzione rappresentava una significativa riduzione dei costi, stimata attorno ai 250 milioni di dollari, circa un terzo del budget previsto per il Grand Tour originale [29]. Dopo l'approvazione dei finanziamenti da parte della NASA e del Congresso statunitense, il progetto MJS fu avviato ufficialmente nel luglio 1972. La direzione fu affidata a Harris M. Schurmeier del JPL nella veste di Project Manager, mentre la supervisione scientifica fu assegnata al fisico Edward C. Stone del Caltech. Il carico utile scientifico fu selezionato attraverso un processo competitivo: su 77 proposte presentate, 11 furono quelle scelte. I team scientifici selezionati si assunsero l'onere di sviluppare e fornire gli strumenti, che sarebbero poi stati integrati nel payload finale della sonda [29].

In quegli stessi anni, parallelamente alla pianificazione della missione MJS, le sonde Pioneer 10 e 11, stavano svolgendo le prime attività di ricerca nei confronti di Giove e Saturno. Le informazioni sull'ambiente radiativo di Giove, trasmesse da quest'ultime, ebbero un impatto diretto sulle scelte progettuali della MJS. All'inizio del 1975, si rese necessaria la decisione di "irrobustire" sia il veicolo spaziale che la strumentazione per aumentarne la resilienza agli intensi effetti delle radiazioni gioviane [30]. A causa dei tempi di volo prolungati, delle distanze estreme dal Sole e degli ambienti ostili da affrontare, il design della sonda MJS si era così evoluto in qualcosa di sostanzialmente diverso da qualsiasi veicolo Mariner precedente. Per dare riconoscimento a questa sostanziale innovazione progettuale, verso la metà del 1977 il progetto fu quindi rinominato Voyager, abbandonando definitivamente la precedente designazione MJS [31].

3.4 Definizione degli Obiettivi: Il Percorso verso lo Spazio Interstellare

La pianificazione delle traiettorie per la missione Voyager fu il risultato di un'attenta negoziazione tra esigenze scientifiche e vincoli ingegneristici. Il Science Steering Group (SSG) dovette valutare un'ampia gamma di opzioni proposte, dove assumevano priorità assoluta i sorvoli ravvicinati dei satelliti gioviani e di Titano, la principale

luna di Saturno. Un ulteriore requisito fondamentale per il sistema saturniano consisteva nell'ottenere una traiettoria che permettesse l'occultazione radio attraverso l'intero spessore radiale degli anelli, consentendo così di sondarne la struttura con tecniche di radio-scienza [32]. Inizialmente sembrò che gli obiettivi di sorvolo di Titano e di scansione degli anelli si escludessero reciprocamente. Tuttavia, analisi più approfondite rivelarono che un singolo veicolo spaziale, con tempi di arrivo accuratamente calibrati, avrebbe potuto soddisfare entrambi i requisiti. La rivelazione di tale soluzione lasciò quindi libera la geometria di volo per il secondo veicolo spaziale, orientando logicamente la scelta verso una traiettoria che mantenesse aperta l'opzione di proseguire verso Urano, subordinatamente al successo degli obiettivi primari di Voyager 1 nel sistema saturniano [32]. Gli intenti scientifici della missione, definiti dal SSG, comprendevano: lo studio comparativo dei sistemi di Giove e Saturno - includendo le tematiche inerenti atmosfere planetarie, superfici satellitari e la natura degli anelli - e l'indagine sul mezzo interplanetario. Con l'approvazione condizionata per l'estensione verso Urano, furono aggiunti ai precedenti ulteriori termini: l'estensione delle indagini sul mezzo interplanetario oltre l'orbita di Saturno e l'applicazione di queste indagini al sistema di Urano [32].

Definito questo complesso quadro di requisiti e vincoli, e trovata una soluzione ingegneristica in grado di soddisfarli, la fase di pianificazione poté considerarsi conclusa. Il successo di questa articolata negoziazione progettuale aprì la strada alla successiva fase operativa, culminata qualche tempo dopo nel lancio dei due veicoli spaziali.

3.5 La Partenza

Il piano di lancio prevedeva che i due veicoli spaziali partissero dalla stessa installazione a Cape Canaveral, in Florida, durante una finestra di lancio compresa tra la fine di agosto e la metà di settembre 1977. La sequenza di lancio fu strategicamente concepita: Voyager 2 sarebbe stato lanciato per primo e avrebbe seguito una traiettoria più lenta, deliberatamente conservativa. Questo approccio serviva a un duplice scopo: preservare la possibilità di sfruttare un assist gravitazionale da Saturno per proseguire verso Urano e, al contempo, evitare l'esposizione agli strati più intensi della radiazione di Giove, a differenza del percorso più diretto previsto per Voyager 1 [32]. Nel giugno 1977, i veicoli spaziali, completarono il trasferimento via terra dal JPL in California a Cape Canaveral, dove furono sottoposti a una campagna di test finali e all'integrazione con il vettore Titan IIIE/Centaur. In questa fase conclusiva, il progetto fu arricchito da un significativo contributo culturale. Su iniziativa del Project Manager John R. Casani, un team guidato da Carl Sagan concepì e realizzò un messaggio destinato a un'eventuale civiltà extraterrestre che un giorno avesse potuto recuperare le sonde. Il risultato fu il "Voyager Golden Record", un disco di rame contenente 116 immagini digitalizzate, saluti in 55 lingue, una selezione di suoni terrestri e brani musicali. Due esemplari identici, protetti da una custodia con istruzioni incise, furono montati sugli scafi delle due sonde, con l'aspettativa che i dati rimanessero decifrabili per scale temporali cosmologiche [33]. Il lancio di Voyager 2 avvenne con successo il 20 agosto 1977. Dopo il ripristino della piattaforma, Voyager 1 fu lanciato a sua volta il 5 settembre 1977, beneficiando di una traiettoria più veloce che gli avrebbe permesso di sorpassare la sonda gemella nel viaggio verso

Giove [34]. Con i due veicoli spaziali finalmente in volo, l'attenzione si spostò dalla pianificazione dal lancio all'analisi loro caratteristiche intrinseche. La riuscita del viaggio interplanetario sarebbe ora dipesa dall'affidabilità della sonda Voyager 2 e dalla sua ingegnerizzata capacità di sopravvivere e operare nell'ambiente ostile dello spazio profondo, aspetti che verranno meglio analizzati nella sezione seguente.

3.6 Il Payload Scientifico della Voyager 2

Le sonde Voyager 1 e 2, identiche nella configurazione e con una massa al lancio di circa 815 kg, furono concepite come sistemi autonomi e integrati, capaci di operare per anni in totale indipendenza dalla Terra. Ognuna di esse era dotata di sottosistemi dedicati alla potenza, alla propulsione, alle telecomunicazioni e alla gestione dei dati, oltre a una completa suite di strumenti scientifici. La loro struttura primaria era costituita da un bus prismatico decagonale di circa 2 metri di diametro e 0.6 metri di profondità, suddiviso in dieci compartimenti ("bays") destinati ad accogliere i vari sottosistemi elettronici e scientifici [35]. Da questo corpo centrale si estendevano i bracci che supportavano gli strumenti e i generatori, conferendo al veicolo la caratteristica configurazione asimmetrica:

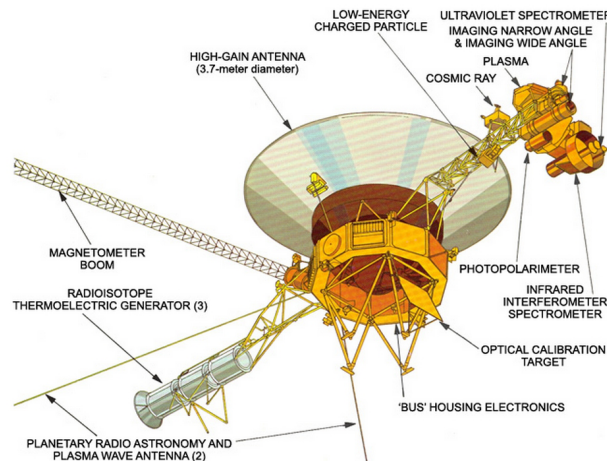


Figura 3.1: Schema Rappresentativo della sonda Voyager 2. Immagine per gentile concessione di NASA/JPL-Caltech [36]

L'alimentazione elettrica era fornita da tre generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG), montati su un traliccio in direzione opposta alla piattaforma scientifica, così da minimizzare le interferenze termiche e magnetiche. Al momento del lancio, gli RTG convertivano circa 7000 W di calore radioattivo in 475 W di potenza elettrica, con un decadimento stimato di circa 7 W all'anno, dovuto al progressivo esaurimento del plutonio-238 e all'invecchiamento delle termocoppie silicio-germanio [35]. Questa scelta progettuale, preferita ai pannelli solari, garantiva operatività continua anche alle grandi distanze eliocentriche, requisito essenziale per una missione destinata a spingersi ai confini del Sistema Solare. La potenza generata dagli RTG alimentava un'architettura di bordo sofisticata, comprendente un sistema di telecomunicazioni basato su un'antenna parabolica ad alto guadagno (*High Gain Antenna* - HGA)

operante nelle bande S e X, un sistema di controllo d'assetto a tre assi stabilizzato da giroscopi e sensori celesti (*Attitude and Articulation Control Subsystem* - AACS), e una serie di computer dedicati alla gestione dei comandi (*Computer Command Subsystem* - CCS) e all'elaborazione dei dati scientifici (*Flight Data Subsystem* - FDS) [35].

Il cuore operativo della missione era rappresentato dalla strumentazione scientifica, organizzata in due categorie funzionali: strumenti di telerilevamento e strumenti per la misurazione in situ. I primi, allocati su una piattaforma di scansione motorizzata in grado di orientarsi con precisione verso i target planetari, consistevano in:

- ISS (*Imaging Science System*): un sistema a due telecamere con ottiche grandangolare e teleobiettivo con 8 lunghezze d'onda, utilizzato per fornire fotografie in un'ampia gamma spettrale [37];
- IRIS (*Infrared Interferometer Spectrometer and Radiometer*): uno strumento per misurare temperatura, composizione chimica e radiazione riflessa nell'infrarosso. Utilizzato per studiare il bilancio termico e le proprietà delle atmosfere [37];
- UVS (*Ultraviolet Spectrometer*): in grado di rilevare atomi e molecole tramite analisi della luce ultravioletta assorbita o emessa, operando nel range 40–180 nm. Progettato per misurare le proprietà atmosferiche e la radiazione UV [37];
- PPS (*Photo-Polarimeter System*): sfruttato per misurare intensità e polarizzazione della luce solare diffusa (235–750 nm) al fine di analizzare particelle atmosferiche, superfici satellitari e fenomeni ottici nei sistemi planetari [37].

I secondi, invece, disposti su due diversi bracci dedicati, comprendevano:

- MAG (*Triaxial Fluxgate Magnetometer*): impiegato per misurare variazioni del campo magnetico solare e dei pianeti esterni, analizzando l'esistenza di campi magnetici planetari e le interazioni con lune e anelli; copre un intervallo dinamico da ± 0.002 G (LFM) a ± 20 G (HFM) [38];
- PLS (*Plasma Spectrometer*): usato per analizzare ioni ed elettroni a bassa energia, determinandone velocità, direzione, densità e temperatura nel vento solare e nelle magnetosfere planetarie. Ha operato su un intervallo di energia per carica compreso tra 10 eV e 5950 eV, suddiviso nelle modalità E1 (10 – 140 eV) ed E2 (140–5950 eV) [39];
- LECP (*Low Energy Charged Particle Instrument*): adoperato per rilevare particelle cariche a bassa e media energia tramite due rivelatori su piattaforma rotante. I suoi sottosistemi coprono intervalli più estesi: LEMPA (elettroni da ~ 26 keV a >10 MeV; protoni e ioni pesanti da ~ 30 keV a ≥ 152 MeV) e LEPT (da ~ 0.05 a 40 MeV/nucleone, con estensione fino a 300–500 MeV/nucleone) [38];
- CRS (*Cosmic Ray System*): in grado di rilevare particelle ad altissima energia provenienti dal vento solare, da campi magnetici planetari e da sorgenti stellari, sfruttando i segnali lasciati durante il loro passaggio attraverso il rivelatore [37];

- PWS (*Plasma Wave Subsystem*): sfruttato per misurare onde di plasma e campi radio a bassa frequenza (10 Hz–56 kHz) tramite due antenne a forma di V condivise con l'esperimento Planetary Radio Astronomy [37];
- PRA (*Planetary Radio Astronomy Investigation*): adoperato alla rilevazione di emissioni radio planetarie su due bande (20.4 kHz–1.3 MHz e 2.3–40.5 MHz) usando due antenne a V condivise con il Plasma Wave Subsystem [37].

Il sottosistema di telecomunicazione contribuiva infine all'esperimento di Radio Scienza (Radio Science System - RSS), sfruttando il segnale radio della sonda per analizzare, tramite occultazioni, le atmosfere planetarie e la struttura degli anelli [35].

Grazie a questa architettura complessa e versatile, Voyager 2 si configurava come un vero e proprio laboratorio scientifico automatizzato, capace di condurre esperimenti nel profondo spazio interplanetario. Tra i suoi strumenti, il PLS rivestì un ruolo centrale: comprenderne il funzionamento è necessario per interpretare in modo corretto i dati acquisiti nell'ambiente uraniano. La sezione seguente ne descrive configurazione operativa e obiettivi scientifici.

3.7 L'Esperimento di Scienza del Plasma: il PLS

3.7.1 Descrizione dell'Apparato

Lo spettrometro al plasma, presente sulle sonde Voyager, è costituito da quattro coppe di Faraday a potenziale modulato, progettate per misurare la distribuzione di energia, densità e velocità delle particelle cariche del plasma interplanetario. Tre di esse — denominate Cup A, B e C — formano un cluster principale orientato approssimativamente lungo la linea Terra-sonda, mentre la Cup D è disposta perpendicolarmente a questo asse.

Il principio di funzionamento delle coppe di Faraday, nel contesto delle sonde Voyager, si basa sul principio della modulazione di potenziale. Una griglia interna allo strumento viene mantenuta a un potenziale di riferimento variabile, sul quale viene sovrapposta un'oscillazione periodica a 400 Hz. Questa configurazione crea una barriera energetica selettiva che filtra le particelle in base al loro rapporto energia/carica: solo quelle il cui valore rientra nella finestra definita dall'oscillazione riescono a raggiungere il collettore. L'elettronica, sintonizzata sulla frequenza di modulazione, misura esclusivamente la componente alternata della corrente, mentre griglie soppressore speciali prevengono la distorsione del segnale causata dall'eventuale presenza di elettroni parassiti. Variando sistematicamente il potenziale di riferimento, lo strumento effettua una scansione completa dello spettro energetico del plasma [40]. Le tre coppe del cluster principale operano come un sistema combinato che consente la determinazione delle proprietà del flusso ionico, fornendo informazioni simultanee sulla densità, velocità e temperatura del plasma [40]. Ciascuna coppa ha un campo di vista conico che si estende lungo direzioni leggermente diverse, definendo nel complesso una copertura emisferica rivolta verso la Terra. Le normali delle tre coppe principali sono inclinate di circa 20° rispetto all'asse del cluster, mentre la Cup D osserva lungo una direzione ortogonale, estendendo la copertura angolare complessiva dello strumento. Il range operativo del PLS copre valori di energia per carica (E/q)

compresi tra 10 e 5950 eV/q, con una risoluzione energetica regolabile [39]. A scopo illustrativo, si specifica che un eV, equivalente a circa 1.602×10^{-19} joule, rappresenta l'energia cinetica acquisita da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt. Lo strumento dispone poi di quattro modalità di misura alternate: due dedicate agli ioni — la modalità a bassa risoluzione (L) e quella a media/alta risoluzione (M) — e due agli elettroni, identificate come E1 (bassa energia) ed E2 (alta energia). La Cup D è l'unica impiegata per le osservazioni elettroniche, mentre il cluster principale misura gli ioni positivi. Durante il funzionamento, il PLS alterna ciclicamente queste modalità operative secondo sequenze di comando predefinite, ottimizzate per bilanciare la risoluzione spettrale con i limiti di telemetria disponibili durante il volo [39, 40].

3.7.2 Gli Obiettivi Scientifici

Dal punto di vista della ricerca, l'impiego del PLS a bordo della sonda Voyager 2 era finalizzato al raggiungimento di determinati risultati scientifici. L'intero sistema, comprendente gli strumenti PLS, LECP e CRS, era stato progettato con l'intento di:

- studiare le proprietà e l'evoluzione radiale del vento solare [37];
- analizzare l'interazione del vento solare con i pianeti visitati, quindi Giove, Saturno, Urano e Nettuno e i rispettivi sistemi satellitari [37];
- indagare circa le origini, le proprietà e la morfologia del plasma magnetosferico proveniente da Giove, Saturno, Urano e Nettuno [37];
- rilevare la presenza di ioni di origine interstellare [37];
- comprendere e caratterizzare la natura del "termination shock" (onda d'urto di terminazione), ossia quella zona dove il vento solare rallenta e diventa più denso, mentre si appresta a incontrare l'eliopausa [37];
- effettuare la prima rilevazione del confine dell'eliopausa e la prima rilevazione del plasma proveniente dall'esterno del nostro sistema solare, il mezzo interstellare [37].

3.8 Il Viaggio e L'Incontro con Urano

Dopo la separazione dall'ultimo stadio del Titan IIIE/Centaur e il dispiegamento delle sue antenne e dei bracci strumentali, Voyager 2 intraprese così il suo lungo viaggio ai confini del Sistema Solare.

Il primo traguardo interplanetario fu raggiunto il 9 luglio 1979 con il sorvolo ravvicinato di Giove. L'incontro non solo fornì dati scientifici fondamentali sul pianeta gigante e i suoi satelliti galileiani, ma fu cruciale per l'ottenimento di un *gravity assist* finalizzato all'aumento della velocità della sonda e al suo indirizzamento verso gli obiettivi successivi [41]. Il secondo incontro con Saturno avvenne il 26 agosto 1981. A seguito del successo di Voyager 1 nel raccogliere dati critici su Titano e sugli anelli planetari, fu concessa l'autorizzazione a utilizzare l'assist gravitazionale di Saturno per indirizzare Voyager 2 verso Urano [41]. Tale manovra sancì l'inizio della fase

successiva della missione, la *Voyager Uranus/Interstellar Mission* (VUIM), avviata ufficialmente il 1° ottobre 1981. Il periodo di crociera quadriennale tra Saturno e Urano fu un'epoca di intensa preparazione in vista dell'incontro con il pianeta. Lo staff tecnico si concentrò sull'ottimizzazione delle risorse e sulla risoluzione delle problematiche ingegneristiche derivanti dall'aumento della distanza dal Sole – che determinava una significativa riduzione dell'intensità luminosa, compromettendo gli obiettivi dell'ISS – e dall'allontanamento dalla Terra, che causava un indebolimento della potenza del segnale radio ricevuto dal Deep Space Network [42]. Furono implementate modifiche al software di bordo, come la "Image Data Compression" (IDC) e il Reed-Solomon encoder, per massimizzare il tasso di trasferimento dati disponibile (massimo 21.6 kbps) [42]. Vennero infine effettuate manovre correttive di traiettoria (TCMs) di alta precisione, tramite cui ci si assicurò che Voyager 2 si dirigesse verso un passaggio ravvicinato programmato a soli 29.000 km da Miranda. La fase di incontro con Urano ebbe inizio ufficialmente con la fase osservativa il 4 novembre 1985, precludendo al raggiungimento del punto di minima distanza il 24 gennaio 1986 [42].

3.9 Le Scoperte di Voyager 2

L'incontro della sonda Voyager 2 con Urano coprì un arco temporale di circa 113 giorni, che va dal novembre 1985 al febbraio 1986 [41]. Le osservazioni condotte rivelarono la complessa natura del sistema uraniano, trasformando sostanzialmente la nostra comprensione a riguardo.

3.9.1 Atmosfera e Dinamica Planetaria

I primi dati sorprendenti riguardarono l'atmosfera e le dinamiche planetarie. Nonostante l'apparente assenza di una significativa fonte interna di calore e il peculiare orientamento che espone le regioni polari alla radiazione solare diretta, le temperature rilevate da Voyager 2 risultarono sostanzialmente uniformi tra poli ed equatore alla pressione di 600 mbar, suggerendo l'esistenza di efficienti meccanismi di redistribuzione energetica [43]. La composizione atmosferica sembrò presentare una frazione molare di elio di 0.15 ± 0.05 , valore superiore a quello riscontrato su Giove e Saturno ma coerente con l'abbondanza solare [43]. La struttura verticale mostrò un minimo termico di 52 ± 2 K a quote corrispondenti a 100 mbar, seguito da un aumento fino a 750 K negli strati superiori, dove venne anche identificata un'estesa ionosfera multistrato. Le osservazioni constatarono inoltre la presenza di uno strato nuvoloso di ghiaccio di metano tra 900 e 1300 mbar e permisero la caratterizzazione dei pattern di circolazione atmosferica, con venti concordi con la rotazione del pianeta capaci di raggiungere velocità fino a 160 m/s a basse latitudini, contrariamente a quanto predetto dai modelli di venti termici. Significative furono anche le rilevazioni di fenomeni luminosi, tra cui l'electroglow nell'ultravioletto e emissioni aurorali sul lato notturno [43].

3.9.2 Gli Anelli

In merito al sistema anulare, Voyager 2 fornì evidenze di una struttura dinamica e potenzialmente giovane. La missione portò alla scoperta di due nuovi anelli (1986U1R e 1986U2R) e di numerose altre strutture simili con bassa profondità ottica ed elevata abbondanza di polvere. L'analisi delle proprietà fisiche rilevò una bassissima riflettanza spettrale delle particelle e l'assenza di particelle di piccole dimensioni nell'anello ϵ . Furono identificati inoltre due satelliti pastori (1986U7 e 1986U8) ai lati di quest'ultimo: la loro reciproca interazione gravitazionale con l'anello, attraverso continui scambi di momento angolare, ne limita la dispersione e contribuisce a mantenerne il bordo netto, suggerendo così un meccanismo di confinamento gravitazionale [43].

3.9.3 Le Lune

Il contributo più innovativo alla caratterizzazione dell'ambiente uraniano portato da Voyager 2 riguardò però il sistema satellitare. La missione rivoluzionò completamente la conoscenza al tempo posseduta attraverso la scoperta di dieci nuovi corpi con diametri compresi tra 40 e 165 km, oltre alla prima caratterizzazione geologica dei cinque satelliti maggiori già noti [43]. Le determinazioni di massa accertarono densità significativamente superiori rispetto ai satelliti saturniani di dimensioni comparabili, indicando una minore frazione di ghiaccio d'acqua. L'analisi geologica mostrò inoltre un'evoluzione differenziata: Oberon e Umbriel presentavano superfici antiche e pesantemente craterizzate; Titania e Ariel mostravano evidenze di attività tettonica estensionale; Miranda, il più interno, rivelava una sorprendente complessità geologica con regioni di terreno giovane caratterizzate da sistemi di faglie e creste, suggerendo processi di mobilitazione criovulcanica favoriti da possibili meccanismi di riscaldamento mareale [43].

3.9.4 La Magnetosfera

Infine, le misurazioni magnetosferiche rivelarono una configurazione unica del pianeta nel Sistema Solare. I primi indizi dell'esistenza di un campo magnetico furono individuati cinque giorni prima del massimo avvicinamento, quando furono rilevate emissioni radio a una distanza di circa 275 raggi uraniani (R_U). Durante il sorvolo, la sonda attraversò dapprima il bow shock a $23.5 R_U$ e successivamente la magnetopausa a $18 R_U$, confermando la presenza di una magnetosfera pienamente sviluppata [43]. Il campo magnetico di Urano rappresenta ancora oggi il principale soggetto di numerosi studi per via della sua configurazione estremamente irregolare; esso possiede, infatti, un dipolo inclinato di circa 60° rispetto all'asse di rotazione e un dislocamento di $0.3 R_U$ dal centro del pianeta. Questa geometria insolita suggerisce che la dinamo magnetica possa non originarsi nel nucleo profondo, ma in uno strato intermedio in cui l'acqua, sottoposta a pressioni elevate, assume proprietà parzialmente conduttive. Il periodo di rotazione del campo, stimato essere di 17.24 ± 0.01 ore, riflette probabilmente la rotazione della regione interna dove il campo viene generato ed è coerente con la durata del giorno uraniano [43].

L'interazione con il vento solare modella la struttura magnetosferica attivamente, generando una lunga coda magnetica simile a quella terrestre, ma di proporzioni

molto maggiori: Voyager 2 misurò un'estensione fino a $67 R_U$ dietro il pianeta, con un raggio medio di $42 R_U$ e un plasma sheet spesso circa $10 R_U$. Poiché durante l'incontro l'asse di rotazione di Urano era orientato quasi direttamente verso il Sole, la coda magnetica risultava ruotare attorno alla linea antisolare con lo stesso periodo di rotazione del pianeta, mostrando un comportamento dinamico e tridimensionale peculiare. All'interno della magnetosfera venne inoltre rilevata una popolazione complessa di particelle cariche, principalmente ioni di idrogeno ed elettroni, organizzata in due componenti principali: una popolazione *warm*, con energia di circa 40 eV e densità fino a 2 cm^{-3} entro $7 R_U$, e una componente *hot*, con energia intorno ai 1000 eV, confinata oltre i $5 R_U$ [43]. Le osservazioni condotte evidenziarono inoltre la presenza di protoni intrappolati con energie comprese tra 4 e 30 keV, le cui distribuzioni spettrali presentavano code che si estendono oltre i 10 MeV. Gli elettroni energetici, con energie superiori a 20 keV, invece, risultavano distribuiti in tutta la magnetosfera, ma mostrarono una brusca interruzione a circa $18 R_U$ sul lato notturno, dove ha origine la coda magnetica. Ulteriore effetto dell'elevata inclinazione del dipolo magnetico fu osservabile nella complessa interazione fra l'ambiente magnetosferico e i principali satelliti uraniani. Tramite l'analisi dei dati fu possibile notare un significativo assorbimento di particelle energetiche da parte di Miranda, Ariel e Oberon, oltre ad una spiccata variabilità di condizioni di radiazione sperimentata dalle stesse lune a causa dell'attraversamento di un ampio intervallo di latitudini magnetiche [43].

Il Ruolo del PLS

In questo quadro articolato, il contributo dello strumento Plasma Science risultò essenziale non solo come tentativo di misura del plasma, ma come fondamento interpretativo dell'intera struttura magnetosferica [43]. Le misurazioni del PLS permisero di associare direttamente le due popolazioni di plasma — *warm* e *hot* — alla loro collocazione spaziale e alle condizioni energetiche, escludendo la presenza significativa di ioni pesanti e confermando l'ipotesi che la corona estesa di idrogeno fosse la fonte primaria del plasma. Le medesime rilevazioni mapparono inoltre i passaggi attraverso lo plasma sheet nella magnetocoda consentendo di tracciare la struttura tridimensionale di questa regione critica [43]. Nel complesso, tali dati furono fondamentali per poter integrare le osservazioni magnetiche con una visione dinamica del trasporto delle particelle, del bilanciamento energetico tra plasma e campo magnetico e delle influenze reciproche tra campo e ambiente plasmatico — evidenziando come Urano rappresenti, ancora oggi, un caso unico tra i giganti gassosi, la cui magnetosfera è plasmata da processi locali, geometria estrema e interazioni complesse.

3.10 L'Eredità della Missione Voyager

A più di quattro decenni dal suo lancio, Voyager 2 continua a rappresentare una pietra miliare per l'esplorazione del Sistema Solare esterno. Dopo aver completato con successo i sorvoli di Giove, Saturno, Urano e Nettuno, la sonda ha proseguito il proprio viaggio oltre i confini dell'eliosfera, entrando nello spazio interstellare e mantenendo tuttora un debole contatto con la Terra [44]. Il passaggio su Urano, avvenuto nel

gennaio 1986, rappresenta a oggi l'unico incontro diretto con il pianeta da parte di una missione spaziale. I dati acquisiti in quella circostanza costituiscono pertanto la sola fonte diretta di informazioni sull'ambiente uraniano, comprese le sue caratteristiche magnetosferiche, atmosferiche e del plasma circostante. Numerosi studi successivi hanno evidenziato come le condizioni osservate durante il sorvolo possano essere state influenzate da configurazioni temporanee o non nominali, suggerendo la necessità di ulteriori osservazioni per caratterizzare in modo più completo il sistema [45]. Negli ultimi anni, Urano è tornato a essere oggetto di crescente interesse scientifico, non solo per colmare le lacune lasciate dalla missione Voyager 2, ma anche per il suo valore come analogo dei pianeti di tipo “ice giant”, la classe di esopianeti più diffusa osservata finora nell'universo [46, 47].

Alla luce di questo rinnovato interesse scientifico, il presente lavoro si propone di valorizzare l'eredità della missione Voyager 2 attraverso una rielaborazione mirata dei dati raccolti dallo spettrometro al plasma (PLS) durante il flyby di Urano. Il capitolo successivo è quindi dedicato a descrivere nel dettaglio la metodologia adottata per l'acquisizione, la processazione e l'analisi di questo dataset storico. Tale approccio metodologico sistematico costituisce il fondamento per un riesame critico delle condizioni del plasma uraniano, aprendo la strada a nuove interpretazioni dei processi fisici che governano l'ambiente magnetosferico del pianeta.

Capitolo 4

Metodologia e Acquisizione Dati

4.1 Contesto Scientifico e Motivazioni

Lo studio del plasma magnetosferico di Urano riveste un particolare interesse per le sue caratteristiche fisiche e geometriche uniche all'interno del Sistema Solare. L'inclinazione di circa 59° tra l'asse di rotazione e quello magnetico, unita al marcato decentramento del dipolo rispetto al centro del pianeta, genera una magnetosfera estremamente asimmetrica e dinamica, la cui struttura varia significativamente con la rotazione planetaria e con le condizioni del vento solare. Tali peculiarità rendono complessa la descrizione del plasma uraniano e pongono interrogativi tuttora aperti sulla sua organizzazione e sulle modalità di interazione con l'ambiente circostante. In questo contesto, le lune interne – in particolare Miranda e Umbriel – rivestono un ruolo potenzialmente rilevante. La loro posizione all'interno della magnetosfera e la loro vicinanza alle regioni di plasma co-rotante suggeriscono la possibilità di processi di interazione diretta tra la superficie dei satelliti e le particelle cariche ambientali. Meccanismi analoghi sono stati osservati nei sistemi di Giove e Saturno, dove satelliti come Io ed Encelado contribuiscono in modo significativo alla composizione e alla densità del plasma magnetosferico. Nonostante l'analogia fisica, il sistema uraniano rimane scarsamente caratterizzato: la breve finestra osservativa del flyby di Voyager 2 fornisce una quantità limitata di dati, che tuttavia costituiscono l'unico strumento disponibile per indagare tali fenomeni. L'analisi dettagliata delle misure di densità, temperatura e velocità ionica ed elettronica raccolte dal PLS consente di esplorare la distribuzione spaziale del plasma e di individuare eventuali variazioni riconducibili alla presenza delle lune interne. Il presente lavoro si inserisce in questo quadro con l'obiettivo di riesaminare in modo sistematico i dati PLS relativi al flyby di Urano, combinandoli con le informazioni orbitali ottenute tramite il toolkit SPICE. Tale approccio consente di assegnare una collocazione spaziale precisa alle misure della sonda, permettendo di valutare l'esistenza di possibili correlazioni tra le anomalie nella densità plasmatica e le orbite dei satelliti Miranda e Umbriel. L'analisi proposta mira quindi a fornire nuove indicazioni sulla dinamica del plasma uraniano e sul contributo potenziale delle lune interne alla sua alimentazione.

4.2 Obiettivi del Lavoro di Tesi

L'obiettivo di questo lavoro è analizzare in modo sistematico i dati raccolti dal Plasma Science Experiment di Voyager 2 durante il sorvolo di Urano, dedicando una specifica attenzione alla distribuzione spaziale della densità plasmatica nel sistema planetario. In particolare, si intende verificare l'eventuale presenza di correlazioni tra le variazioni della densità del plasma e le posizioni orbitali delle lune interne, con un focus specifico su Miranda e Umbriel. Tali satelliti, per la loro collocazione e dimensione, rappresentano i candidati più plausibili per influenzare localmente la popolazione di plasma attraverso processi di interazione diretta con il campo magnetico e il flusso di particelle cariche.

Per affrontare questa analisi è stato sviluppato un approccio metodologico basato su strumenti di calcolo numerico in Python, che consente di integrare i dati fisici misurati dal PLS con le informazioni orbitali derivate dai kernel SPICE. In particolare, l'utilizzo delle librerie *Speasy* [48] e *SpiceyPy* [49] ha permesso rispettivamente l'estrazione automatica dei dataset dal database AMDA e la ricostruzione precisa della traiettoria della sonda nel sistema uraniano. Dopo un'adeguata fase di filtraggio e pre-elaborazione, sono state sviluppate delle rappresentazioni grafiche atte ad illustrare visivamente le informazioni contenute all'interno dei dataset indagati. Successivamente, mediante tecniche di fitting numerico implementate con SciPy, è stata analizzata la distribuzione della densità del plasma in funzione della distanza radiale dal pianeta con l'intento di individuare eventuali deviazioni statisticamente significative in prossimità delle orbite lunari. Lo scopo finale della tesi è quindi duplice: da un lato, valorizzare l'eredità scientifica della missione Voyager 2 attraverso un rinnovato utilizzo dei suoi dati in chiave moderna; dall'altro, fornire nuove indicazioni sulla struttura e le sorgenti del plasma magnetosferico di Urano, contribuendo alla comprensione dei processi di interazione tra il pianeta e i suoi satelliti.

4.3 Dataset e Strumenti di Analisi

Per poter condurre l'analisi proposta, è stato in primo luogo necessario disporre di dati accurati relativi alle proprietà del plasma magnetosferico di Urano, così come registrati dal PLS a bordo della sonda Voyager 2 durante il flyby del gennaio 1986. Come già accennato in precedenza, il PLS è uno spettrometro al plasma progettato per misurare le caratteristiche principali della popolazione ionica ed elettronica presente nell'ambiente circostante la sonda, tra cui densità di numero, temperatura e velocità del flusso delle particelle cariche. I dati utilizzati sono stati resi disponibili attraverso l'Automated Multi-Dataset Analysis (AMDA) [50], una piattaforma gestita e sviluppata dal CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas) [51], che consente l'accesso ai principali dataset spaziali tramite interfaccia web o API (*Application Programming Interface*) dedicate. In questo lavoro, l'estrazione è stata automatizzata mediante la libreria Python *Speasy*, che opera come client dell'API di AMDA, consentendo di interrogare direttamente il database e scaricare in modo riproducibile i parametri fisici necessari in un formato adatto all'analisi [52]. Oltre ai dati di plasma, si è reso necessario conoscere con precisione la posizione e l'orientamento della sonda rispetto a Urano e ai suoi satelliti nel corso del flyby. A tale scopo è stato impiegato il NASA SPICE Toolkit, nella sua implementazione

Python `SpiceyPy`, che consente di accedere ai kernel SPICE per la ricostruzione della geometria della missione [53]. Attraverso questi strumenti è stato possibile associare a ogni misura del PLS la corrispondente posizione spaziale della sonda in coordinate planetocentriche (IAU URANUS), così da poter rappresentare i dati non solo in funzione del tempo, ma anche della distanza radiale e della posizione relativa nel sistema uraniano. Tutte le operazioni di trattamento e analisi sono state condotte in ambiente Python, sfruttando librerie specifiche per la manipolazione di dati scientifici: NumPy e Pandas per la gestione dei dataset, Matplotlib per la visualizzazione grafica e SciPy per le procedure di fitting numerico e di regressione statistica. Questa infrastruttura ha permesso di integrare in modo coerente le diverse fasi del lavoro – dall’acquisizione automatizzata dei dati alla loro analisi quantitativa – garantendo riproducibilità e tracciabilità dell’intero processo.

4.4 Estrazione e pre-elaborazione dei dati

A partire dagli strumenti descritti nella sezione precedente, la prima fase operativa del lavoro ha riguardato l’estrazione automatizzata dei dati del Plasma Science Experiment dal database AMDA. Utilizzando la libreria `Speasy` in ambiente Python, è stato possibile interrogare il servizio web di AMDA tramite API dedicate, richiedendo i dataset relativi al flyby di Urano. L’estrazione ha restituito due insiemi di serie temporali, corrispondenti alla popolazione ionica e a quella elettronica, comprendenti le relative informazioni inerenti le grandezze principali misurate dal PLS: densità, velocità del flusso e temperatura del plasma.

I dati così ottenuti sono stati in seguito raggruppati e inseriti all’interno di due distinti DataFrame di Pandas per agevolarne la gestione e consentire una successiva manipolazione numerica più flessibile. Il processo di pre-elaborazione è consistito innanzitutto nella pulizia dei dataframe da indici duplicati e nella definizione di una serie di funzioni dedicate alla rimozione dei valori NaN o non fisicamente plausibili. L’intera pipeline di estrazione e pre-trattamento, implementata in Python, garantisce la riproducibilità completa del processo: ogni fase, dall’acquisizione automatica dei dati al filtraggio numerico, è stata codificata tramite script dedicati che consentono di replicare i risultati e di aggiornare facilmente l’analisi in caso di variazioni dei parametri o dei dataset di input.

4.5 Integrazione con i dati orbitali SPICE

Una volta completata la fase di estrazione e pre-elaborazione dei dati PLS, è stato necessario assegnare a ciascuna misura una precisa collocazione spaziale all’interno del sistema uraniano. Questo passaggio rappresenta un requisito fondamentale per qualsiasi analisi fisica del plasma, poiché la densità e la temperatura del plasma possono variare significativamente a seconda della distanza dal pianeta, della posizione rispetto al piano equatoriale e della vicinanza ai satelliti. Per realizzare questa integrazione, sono stati impiegati i kernel SPICE messi a disposizione dal NAIF (Navigation and Ancillary Information Facility), comprendenti informazioni orbitali (SPK), di assetto della sonda (CK) e dei sistemi di riferimento (FK, IK).

La libreria `SpiceyPy` ha consentito di accedere a tali dati all’interno dell’ambiente

Python, facilitando l'estrazione delle coordinate della sonda in qualsiasi istante temporale. In particolare, per ogni campione temporale del dataset PLS, sono state calcolate:

- Le coordinate cartesiane della sonda Voyager 2 normalizzate rispetto al raggio di Urano (25559 km) nel sistema di riferimento IAU URANUS;
- Le corrispondenti coordinate sferiche (distanza radiale, longitudine est, latitudine)

Parallelamente a questo lavoro di integrazione, tramite l'utilizzo della libreria `SpiceyPy`, è stato altresì possibile ricavare le informazioni necessarie a descrivere la posizione dei principali satelliti uraniani nei medesimi istanti di rilevamento della sonda. L'uso dei kernel SPICE ha permesso lo svolgimento dell'analisi in un sistema di riferimento coerente e ben definito, come IAU URANUS, garantendo che tutte le misure fossero confrontabili tra loro e con i dati orbitali. Una volta completata l'integrazione, i dataset risultanti contengono, per ciascun istante di osservazione, sia le grandezze fisiche misurate dallo strumento PLS sia la collocazione della sonda nel sistema uraniano. Questa combinazione di informazioni è stata essenziale per le successive fasi di analisi e fitting, permettendo di valutare eventuali correlazioni tra la distribuzione della densità plasmatica e la posizione dei satelliti, nonché di rappresentare i dati in funzione della distanza radiale dal pianeta sia nella fase inbound sia in quella outbound del flyby.

L'integrazione dei dati fisici con le informazioni orbitali di SPICE costituisce dunque un passaggio necessario che conferisce valore scientifico alle misure, trasformandole da serie temporali isolate a un dataset spazialmente contestualizzato, pronto per l'analisi quantitativa e per l'individuazione di possibili interazioni plasma-luna.

Capitolo 5

Analisi e Discussione dei Risultati

5.1 Rappresentazione Spaziale dei Dati Plasmatici

La fase iniziale dell'analisi è stata dedicata alla rappresentazione spaziale dei principali parametri plasmatici contenuti nei dataset estratti, con l'obiettivo di ottenere una visione d'insieme del comportamento della densità e della temperatura lungo la traiettoria di Voyager 2 durante il flyby di Urano.

5.1.1 Profilo di Densità Radiale

Un'analisi preliminare dell'ambiente di plasma uraniano è stata condotta esaminando i profili di densità elettronica e ionica in funzione della distanza radiale dal pianeta, espressa in raggi uraniani R_U . La Figura 5.1 mostra i dati raccolti dallo strumento PLS a bordo di Voyager 2. L'asse verticale logaritmico evidenzia le ampie variazioni di densità, che si estendono per diversi ordini di grandezza.

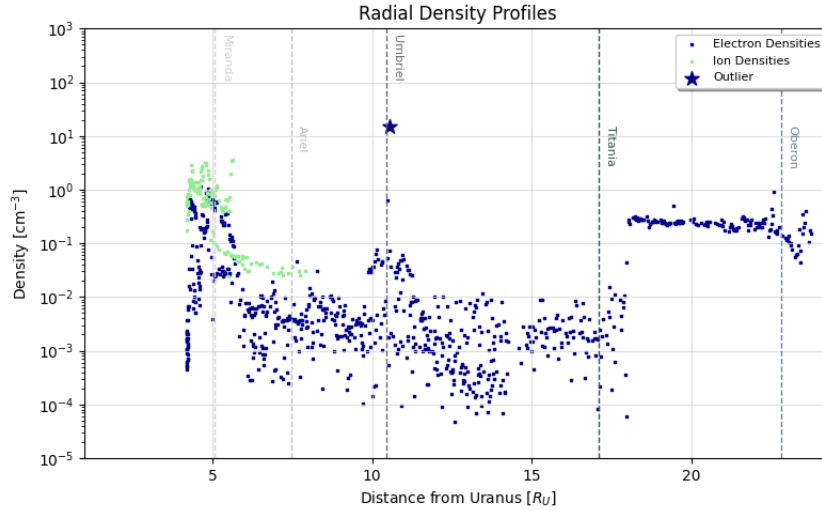


Figura 5.1: Rappresentazione dei profili radiali di densità elettronica e ionica rilevata dalla sonda Voyager 2 e fornita in scala logaritmica. Le linee tratteggiate corrispondono alla distanza, in termini di raggi planetari R_U , delle principali lune uraniane

L'andamento generale rivela una magnetosfera strutturata. Nella regione interna ($< 8 R_U$), si osserva la massima densità di plasma, con valori che raggiungono circa 1 cm^{-3} e decrescono rapidamente con la distanza. Procedendo verso l'esterno, la densità ionica di fondo si attesta su valori molto più bassi, tipicamente tra 10^{-3} e 10^{-2} cm^{-3} . In questo contesto generale, emergono due caratteristiche localizzate di notevole interesse per questa tesi.

1. In corrispondenza dell'orbita di Miranda ($\sim 5.2 R_U$), si nota che la luna orbita al confine di una regione di plasma relativamente denso. La densità, sia elettronica che ionica, subisce un drastico calo immediatamente all'esterno della sua orbita, suggerendo che la luna possa agire come una sorgente di plasma o interagire fortemente con il bordo del plasma interno.
2. In prossimità dell'orbita di Umbriel ($\sim 10.5 R_U$), invece, si osserva un dato puntuale caratterizzato da una densità elettronica di circa 15 cm^{-3} . Tale valore risulta significativamente superiore a quello del plasma circostante (fino a quasi quattro ordini di grandezza). Tuttavia, trattandosi di un singolo rilievo classificato come outlier, la sua interpretazione richiede cautela. L'anomalia potrebbe essere indicativa di un fenomeno locale non ancora chiarito, ma non si esclude che possa derivare da effetti strumentali, condizioni transienti o da limitazioni legate alla risoluzione dei dati disponibili.

Questa prima analisi ha permesso di evidenziare meglio l'andamento generale decrescente della densità con l'aumentare della distanza, ma soprattutto la presenza di due picchi localizzati in prossimità degli intervalli radiali di Miranda e Umbriel. Tali discontinuità, significativamente distanti dai valori medi delle regioni adiacenti, sembrerebbero rappresentare un primo indizio della possibile influenza delle lune interne sulla popolazione di plasma circostante.

5.1.2 Metodologia Dell'Analisi Tridimensionale

Sulla base di tale supposizione, si è ritenuto opportuno quindi approfondire lo studio attraverso una caratterizzazione spaziale più dettagliata, in grado di rappresentare l'evoluzione tridimensionale dei parametri lungo la traiettoria della sonda. Per rendere meglio leggibile la distribuzione tridimensionale delle grandezze fisiche misurate, i dati sono stati proiettati su due differenti tipologie di grafici: i Meridian Chart e i Longitude Chart, strumenti già impiegati nello studio delle magnetosfere planetarie per la loro capacità di rappresentare l'evoluzione spaziale dei parametri in funzione della geometria del sistema (vedi [54]). La descrizione dettagliata del loro funzionamento è riportata nei paragrafi seguenti.

Meridian Chart

I Meridian Chart appaiono come grafici polari semicircolari, nei quali il pianeta è posto al centro: l'asse radiale misura la distanza dalla sonda al pianeta, mentre l'angolo polare, compreso tra -90° e $+90^\circ$, viene interpretato come latitudine uranocentrica. Il piano di rappresentazione risulta dunque ortogonale all'equatore scelto e consente di visualizzare l'andamento delle grandezze fisiche lungo sezioni meridiane della magnetosfera.

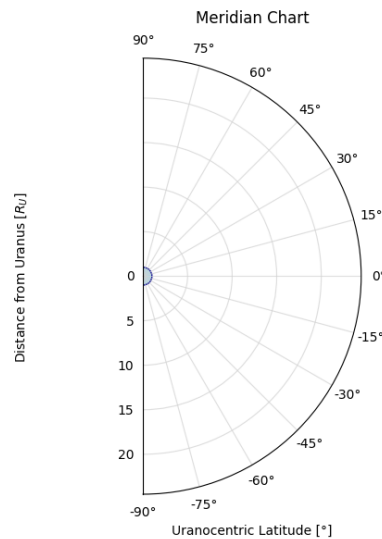


Figura 5.2: Esempio di grafico: Meridian Chart

Longitude Chart

I Longitude Chart, invece, assumono la forma di grafici polari circolari: anche in questo caso il pianeta occupa il centro, mentre l'asse radiale misura la distanza e l'angolo polare rappresenta la longitudine est della sonda rispetto al pianeta. Il piano di rappresentazione coincide con l'equatore uraniano e consente di evidenziare come le proprietà del plasma varino lungo la traiettoria orbitale in funzione della longitudine.

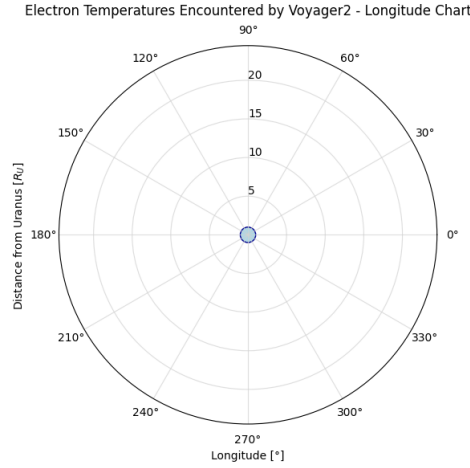


Figura 5.3: Esempio di grafico: Longitude Chart

5.1.3 La Traiettoria di Voyager 2

Per contestualizzare spazialmente le misurazioni del plasma, è stata in primo luogo analizzata la traiettoria della sonda Voyager 2, rappresentata in Figura 5.4. L'immagine mostra due proiezioni della traiettoria in un sistema di coordinate planetocentrico co-rotante (IAU URANUS), essenziale per correlare i dati con le posizioni fisse rispetto al pianeta e alle lune.

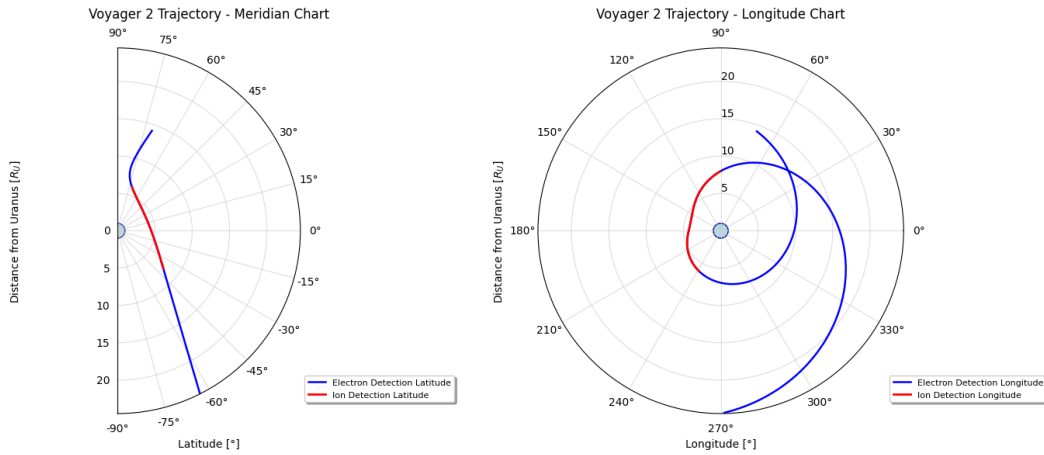


Figura 5.4: Traiettoria di Voyager 2 durante il flyby di Urano

La proiezione meridianale (pannello sinistro) descrive il percorso della sonda in funzione della distanza radiale e della latitudine. La traiettoria è quella tipica di un flyby iperbolico, con un segmento di ingresso (inbound) da latitudini meridionali, un transito del piano equatoriale in corrispondenza del punto di massimo avvicinamento (C/A), quantificato a $\sim 4.2 R_U$, e un segmento di uscita (outbound) verso latitudini settentrionali elevate. Questa traiettoria quasi polare ha permesso di campionare diverse regioni della magnetosfera.

La proiezione sul piano equatoriale (pannello destro) rivela una traiettoria a spirale.

Questa morfologia è un artefatto della visualizzazione in un sistema di coordinate co-rotante e dimostra che, durante il tempo di attraversamento del sistema, la rotazione planetaria ha esposto la sonda a un vasto settore longitudinale della magnetosfera. Questa ampia copertura è decisiva per distinguere le strutture di plasma stazionarie nel frame co-rotante da fenomeni temporali. Infine, la distinzione cromatica è utile per comprendere la copertura dei dati dello strumento PLS. La traccia blu indica l'intera porzione di traiettoria in cui sono stati rilevati elettroni, mentre la traccia rossa, più breve, evidenzia la regione in cui sono state ottenute misurazioni valide per gli ioni. Tale regione è confinata alla parte più interna del sorvolo ($< 8 R_U$), in accordo con le maggiori densità di plasma osservate in quell'area e con i limiti di sensibilità dello strumento. Questa geometria e copertura dei dati sono il fondamento per l'interpretazione delle mappe di plasma discusse nelle sezioni successive.

5.1.4 Mappe Spaziali dei Parametri Plasmatici

Con l'intento di superare la visione unidimensionale del profilo radiale precedentemente riportato e investigare la morfologia spaziale delle strutture di plasma, sono state generate mappe bidimensionali per i principali parametri misurati dal PLS: densità elettronica (n_e), densità ionica (n_i) e temperatura elettronica (T_e). Dal punto di vista generale queste mappe proiettano i dati nella traiettoria della sonda nel sistema di coordinate co-rotante IAU URANUS. L'uso di una scala logaritmica per le densità permette di enfatizzare le variazioni anche nelle regioni più tenui. La sovrapposizione delle orbite delle lune maggiori serve come riferimento per correlare visivamente le feature del plasma con la posizione dei satelliti, ponendo le basi per l'analisi dei processi di interazione.

Nelle sezioni successive vengono fornite le visualizzazioni individuali dei parametri indagati con la rispettiva disamina interpretativa.

5.1.5 Morfologia del Plasma Elettronico

La Figura 5.5 presenta le mappe di densità elettronica (n_e) ottenute lungo la traiettoria di Voyager 2, proiettate sia sul piano meridiano che su quello equatoriale. Per una visualizzazione completa, i dati sono mostrati sia in scala logaritmica (pannelli superiori), per evidenziare le variazioni su più ordini di grandezza, sia in scala lineare (pannelli inferiori), per risolvere la struttura delle regioni a più alta densità.

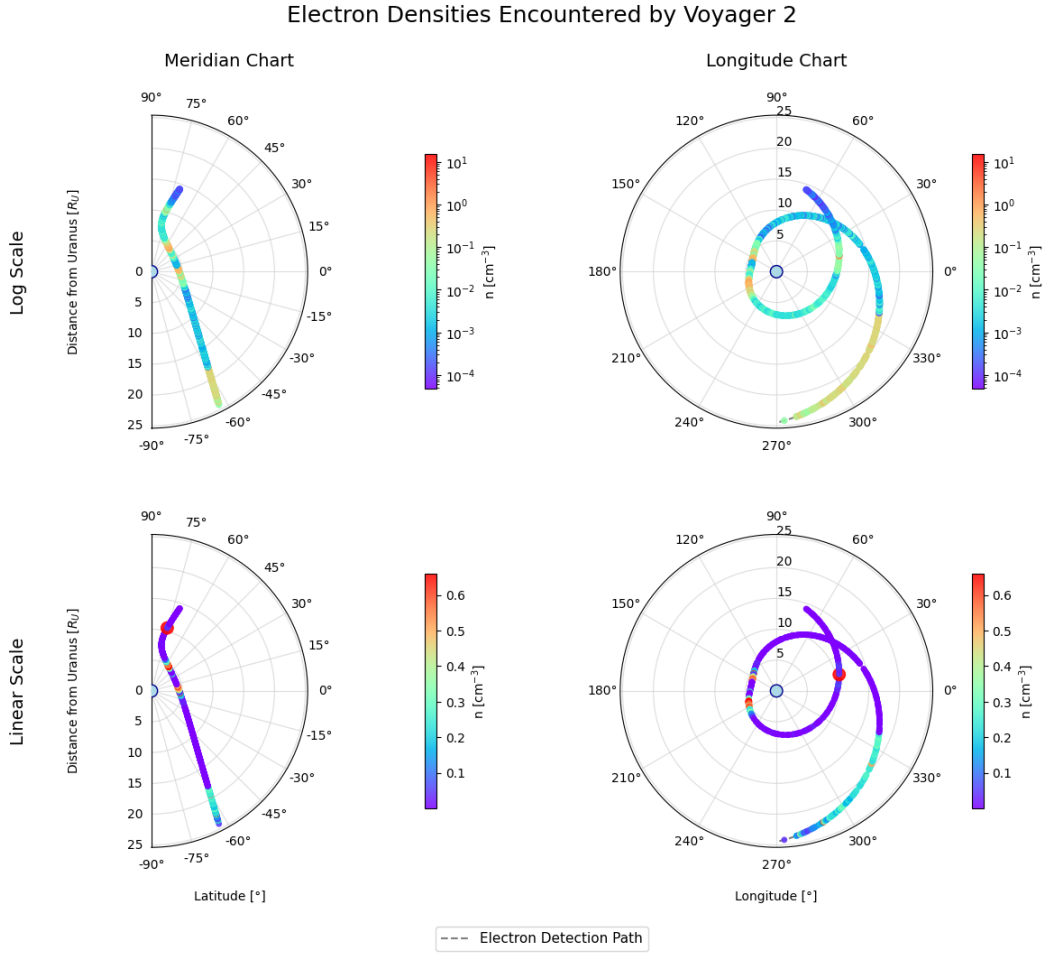


Figura 5.5: Rappresentazione spaziale della densità elettronica rilevata da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

Struttura Generale e Contributo delle Diverse Scale

L'analisi complessiva delle mappe rivela la presenza di una struttura di plasma ben definita e confinata nella magnetosfera più interna, come già suggerito dai dati precedenti.

- **Scala Logaritmica (pannelli superiori):** Questa rappresentazione è ideale per apprezzare l'ampio range dinamico della densità elettronica. Si osserva un nucleo denso (colori dal ciano al giallo, $n_e \sim 0.1 - 1 \text{ cm}^{-3}$) che degrada rapidamente verso l'esterno in un ambiente molto più tenue (colori dal blu al viola, $n_e < 0.01 \text{ cm}^{-3}$). La scala logaritmica enfatizza il forte gradiente radiale negativo, mostrando come la densità crolli di oltre due ordini di grandezza in uno spazio di pochi raggi uraniani.
- **Scala Lineare (pannelli inferiori):** Questa scala, limitata a valori più alti ($0 - 0.6 \text{ cm}^{-3}$), agisce come un "filtro" visivo, isolando con maggiore chiarezza il

nucleo di plasma più denso. Gran parte della traiettoria appare di colore viola scuro, indicando che la densità è al di sotto della soglia di 0.1 cm^{-3} . Ciò che emerge è una regione di alta densità (colori arancione/rosso, $n_e > 0.4 \text{ cm}^{-3}$) concentrata quasi esclusivamente a distanze radiali inferiori a $5 R_U$. Questa visualizzazione consente di delineare con maggiore precisione i confini della struttura interna ad alta densità rilevata dallo strumento.

Correlazione Spaziale con Orbite Lunari

La sovrapposizione delle orbite lunari sulle mappe di densità elettronica (Figura 5.6) permette di decifrare il ruolo dei satelliti nel modellare la distribuzione del plasma. L'analisi sembra rivelare un'interazione a due livelli: una su larga scala associata a Miranda, e una locale e più tenue associata a Umbriel.

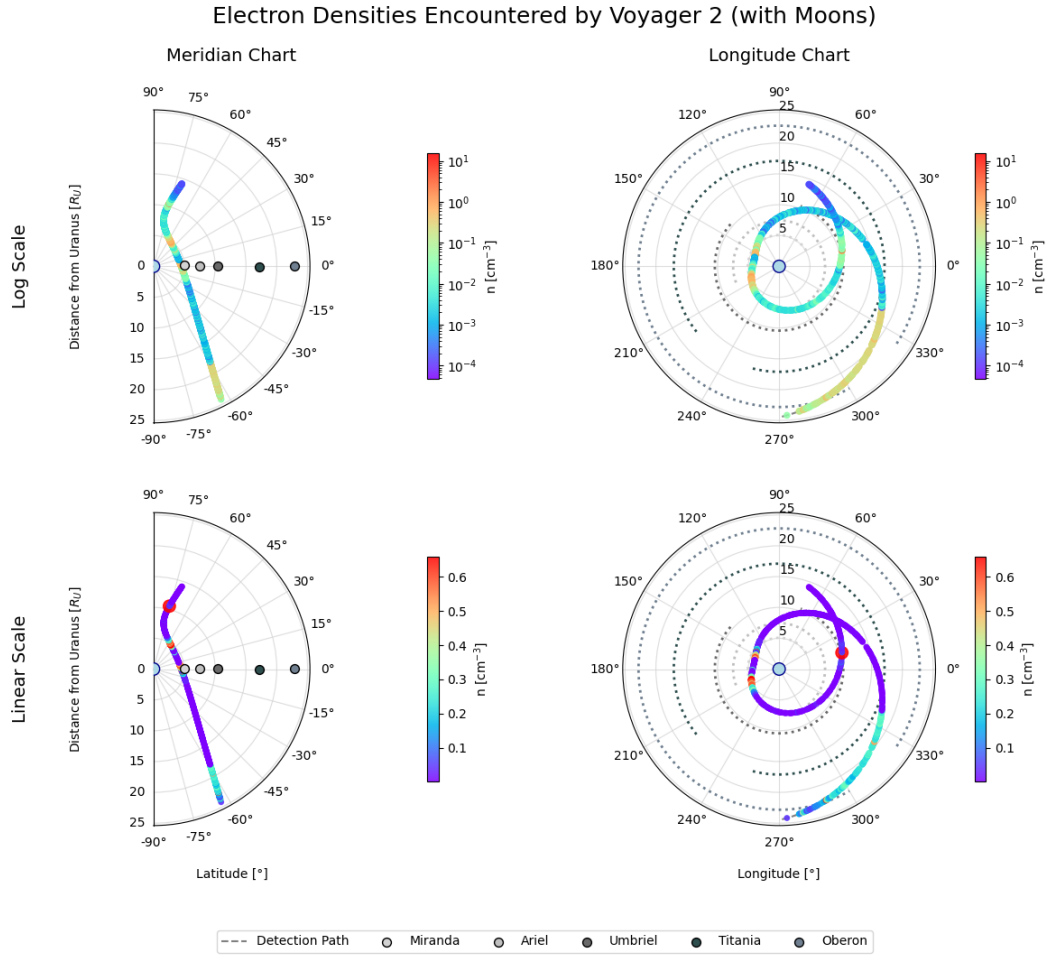


Figura 5.6: Rappresentazione della correlazione fra la densità elettronica rilevata da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano e la posizione delle principali lune uraniane. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. Nelle rappresentazioni lineari, i valori sono stati normalizzati limitando l'impatto degli outlier e la dimensione dei marker scalata proporzionalmente ai dati per evidenziarne la distribuzione. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

La regione di massima densità elettronica ($n_e > 0.3 \text{ cm}^{-3}$) risulta prevalentemente concentrata all'interno dell'orbita di Miranda ($R \approx 5.2 R_U$). Osservando in particolare la mappa equatoriale in scala lineare (pannello in basso a destra), il percorso della sonda mostra che, dopo aver attraversato questa regione più densa, la densità elettronica diminuisce rapidamente. Questa stretta correlazione spaziale potrebbe costituire una plausibile evidenza per un'interazione diretta tra Miranda e il plasma. A tal merito si possono formulare due ipotesi principali, non mutuamente esclusive:

1. Miranda come sorgente: La superficie ghiacciata di Miranda, bombardata da particelle energetiche (processo di sputtering), potrebbe rilasciare molecole d'acqua che, una volta ionizzate, contribuirebbero all'aumento di densità osservato nelle regioni interne dell'ambiente magnetosferico di Urano. In questo scenario, parte del plasma misurato alle piccole distanze radiali potrebbe avere origine locale nella vicinanza della luna, analogamente a quanto accade nel sistema satellitare saturniano [55].
2. Miranda come assorbitore/confine: Orbitando vicino al limite della zona in cui le densità risultano più elevate, Miranda potrebbe interagire con il flusso di plasma, assorbendolo o deflettendolo [56]. Questo tipo di interazione produrrebbe una diminuzione locale della densità o un gradiente netto tra l'interno e l'esterno della sua orbita, coerente con quanto evidenziato dal profilo misurato da Voyager 2 [57].

Un'ulteriore ispezione più attenta della mappa in scala logaritmica (pannelli superiori), sensibile alle variazioni a bassa densità, rivela inoltre una seconda feature di notevole interesse. In prossimità dell'orbita di Umbriel ($R \approx 10.5 R_U$) si osserva un picco localizzato della densità elettronica. Sebbene meno drammatico di quanto osservato nei confronti di Miranda, questo aumento è significativo: la densità passa da un fondo di $\sim 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ a un picco locale di circa $\sim 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$, un aumento di due ordini di grandezza. Anche in questo caso, la limitata estensione spaziale della regione in cui tale incremento viene rilevato, rispetto all'ambiente circostante, potrebbe essere coerente con un'interazione locale tra Umbriel e il plasma magnetosferico. Tuttavia, data la natura puntuale dell'osservazione e l'assenza di ulteriori indizi complementari, tale interpretazione deve essere considerata con cautela e valutata nel contesto delle possibili influenze di processi dinamici più ampi.

Sintesi dell'Interpretazione

I dati di densità elettronica delineano quindi un quadro complesso e stratificato. Dalle misure si nota un marcato cambiamento nel profilo radiale delle densità, suggerendo, in prima istanza, un possibile ruolo di Miranda nel modulare la distribuzione locale del plasma e nel definire la transizione tra regioni interne più dense e regioni esterne più rarefatte. Parallelamente, le variazioni osservate in corrispondenza dell'orbita di Umbriel costituiscono un'ulteriore indicazione della sua presunta interazione attiva con il plasma magnetosferico. Al contrario, l'assenza di segnali distintivi presso l'orbita di Ariel, anche utilizzando scale più sensibili come quella logaritmica, evidenzia come le firme associate a Miranda e Umbriel siano probabilmente fenomeni più specifici localizzati lungo la traiettoria di Voyager 2.

5.1.6 Morfologia del Plasma Ionico

A complemento dell'analisi della popolazione elettronica, la Figura 5.7 illustra le mappe di densità ionica (n_i) nella magnetosfera interna di Urano. I dati sono presentati in una vista "zoomata" ($R < 8 R_U$), coerentemente con la limitata copertura spaziale delle misurazioni ioniche dello strumento PLS. Anche in questo caso, l'utilizzo di scale logaritmiche e lineari permette di discernere la struttura del plasma a diversi livelli di dettaglio.

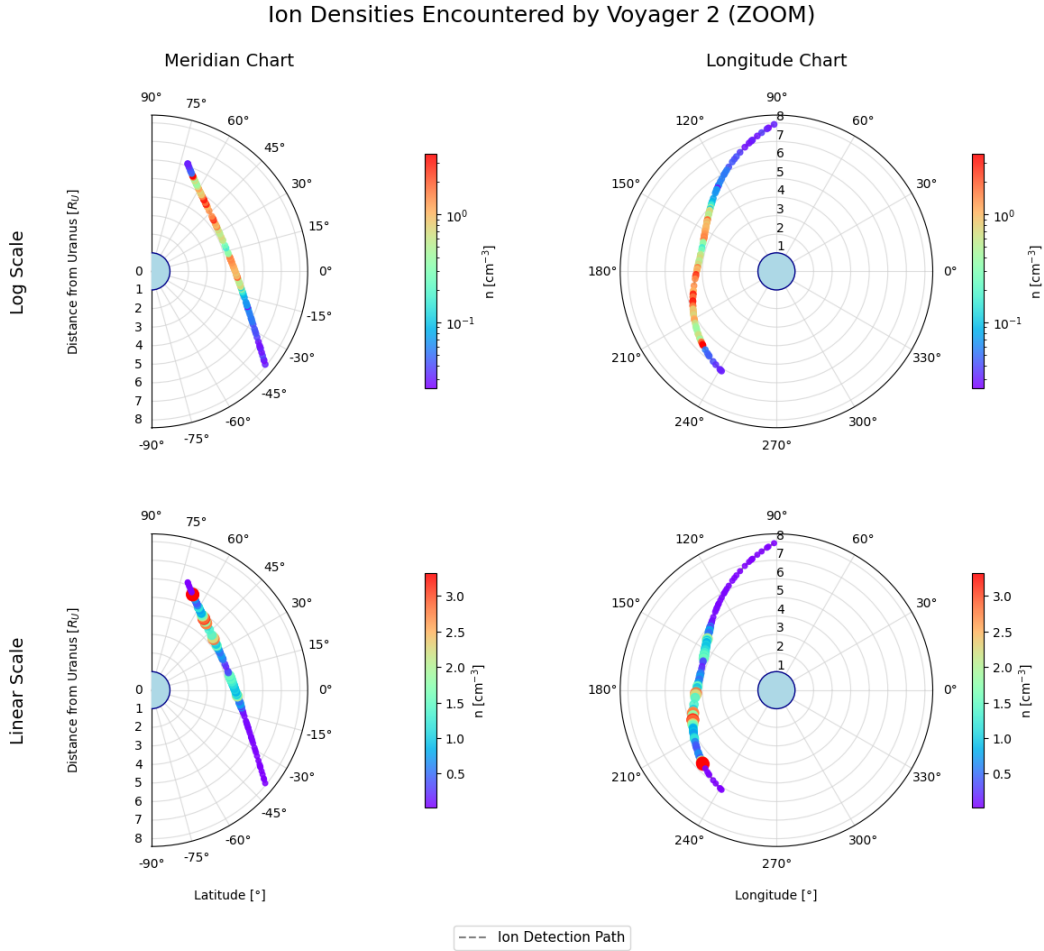


Figura 5.7: Rappresentazione spaziale della densità ionica rilevata da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. Nelle rappresentazioni lineari, i valori sono stati normalizzati limitando l'impatto degli outlier e la dimensione dei marker scalata proporzionalmente ai dati per evidenziarne la distribuzione. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

Struttura Generale e Contributo delle Diverse Scale

L'esame delle mappe ioniche mette maggiormente in evidenza la presenza di una regione interna caratterizzata da densità significativamente più elevate, consentendo

di delinearne l'estensione e le variazioni più fini

- **Scala Logaritmica (pannelli superiori):** Questa visualizzazione mostra un gradiente di densità radiale molto pronunciato. La densità ionica decresce di oltre un ordine di grandezza, passando da valori superiori a 1 cm^{-3} (colori caldi) nella regione più interna a circa 0.1 cm^{-3} (colori blu/viola) verso $7 R_U$. La distribuzione appare relativamente simmetrica attorno al pianeta, suggerendo una struttura stabile nel sistema di riferimento co-rotante.
- **Scala Lineare (pannelli inferiori):** La visualizzazione in scala lineare permette di evidenziare con maggiore chiarezza l'area in cui si concentrano i valori massimi di densità. I picchi più elevati (colori rossi, $n_i > 2.5 \text{ cm}^{-3}$) risultano confinati in un intervallo radiale ristretto, all'interno di circa $4.5 R_U$, in prossimità del punto di massimo avvicinamento di Voyager 2.

Il confronto diretto tra le mappe di densità ionica ed elettronica (Figura 5.5) riveste un'importanza diagnostica fondamentale. Le due distribuzioni mostrano una sorprendente concordanza nella localizzazione delle regioni di massima densità e nel comportamento del gradiente radiale. Inoltre, il fatto che i valori massimi risultino comparabili ($n_i \approx n_e$) è pienamente coerente con il principio di quasi-neutralità del plasma [58], e rafforza la solidità e la consistenza interna delle misure acquisite durante il flyby.

Correlazione Spaziale con Orbite Lunari

Come nel caso precedente, la sovrapposizione delle orbite lunari (Figura 5.8) permette di affinare l'interpretazione del ruolo delle lune.

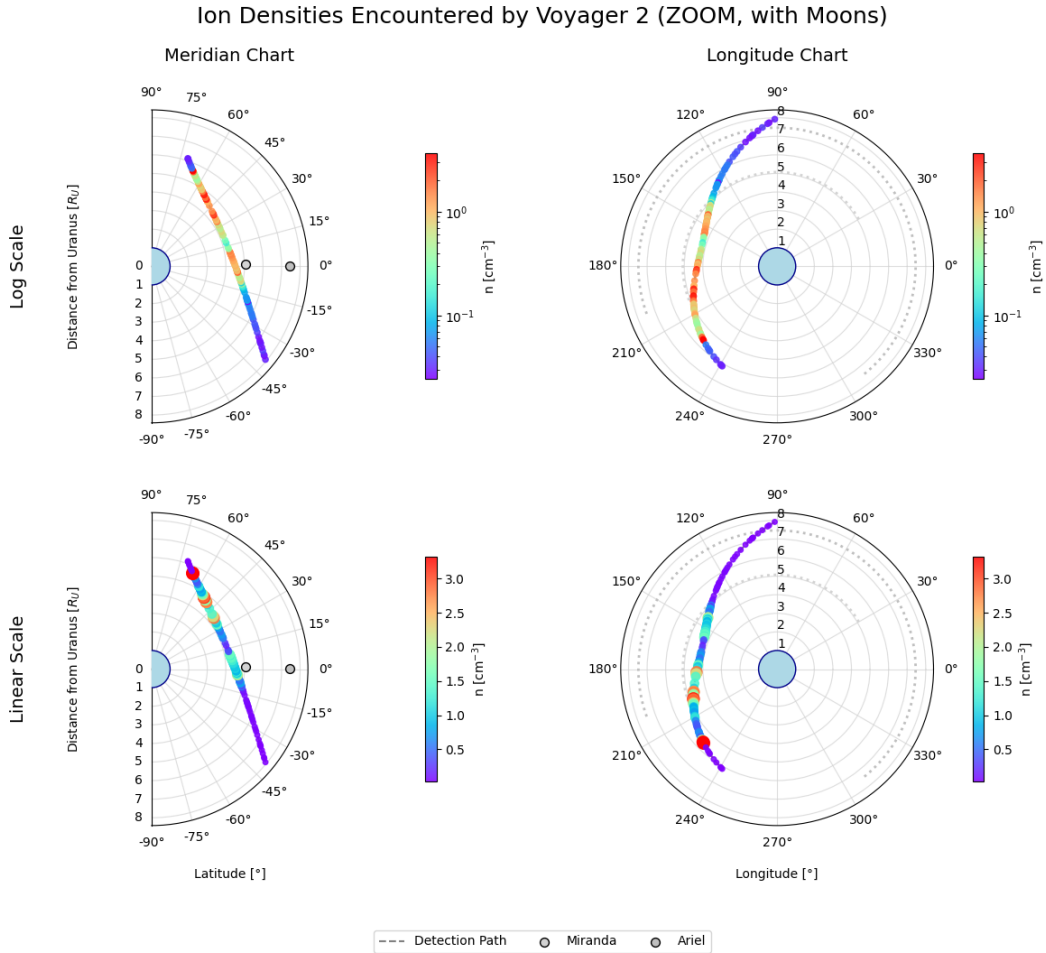


Figura 5.8: Rappresentazione della correlazione fra la densità ionica rilevata da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano e la posizione delle principali lune uraniane. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. Nelle rappresentazioni lineari, i valori sono stati normalizzati limitando l'impatto degli outlier e la dimensione dei marker scalata proporzionalmente ai dati per evidenziarne la distribuzione. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

A differenza di quanto osservato nella popolazione elettronica, dove la variazione di densità appare più brusca, il comportamento della componente ionica mostra una transizione più graduale. L'orbita di Miranda ($R \approx 5.2 R_U$) risulta collocata al di fuori della regione in cui si registrano i valori massimi di densità ionica ($n_i > 1.5 \text{ cm}^{-3}$). La luna si trova infatti all'interno del tratto discendente del gradiente, dove le densità assumono valori intermedi (colori ciano/verde). Questo quadro suggerisce che, pur potendo contribuire a modulare localmente la distribuzione del plasma, Miranda non coincide con il limite esterno della zona a più alta densità ionica; la sorgente principale di questa popolazione sembra invece collocarsi più internamente, o potrebbe riflettere processi che non dipendono unicamente dall'interazione con la luna. Per quanto riguarda Ariel ($R \approx 7.5 R_U$), invece, la sua orbita si trova al margine della regione in cui la densità ionica resta misurabile con buona affidabilità. Nelle vicinanze della sua orbita i valori osservati risultano molto bassi ($n_i \approx 0.1 \text{ cm}^{-3}$), e non mostrano alcuna indicazione di un incremento locale, suggerendo che l'interazione di questa con il plasma lungo la traiettoria di Voyager 2 sia debole o non rilevabile con gli strumenti disponibili.

Sintesi dell'Interpretazione

In sintesi, l'analisi della densità ionica evidenzia una regione interna relativamente compatta in cui il plasma raggiunge i valori più elevati. La buona corrispondenza con i profili elettronici conferma la coerenza complessiva delle misure e risulta compatibile con il principio di quasi-neutralità [58]. Il fatto che il massimo di densità ionica si collochi ben all'interno dell'orbita di Miranda suggerisce che i processi responsabili dell'accumulo della popolazione ionica siano prevalentemente attivi nelle regioni interne della magnetosfera. Tale interpretazione risulta coerente con i modelli basati sui dati di Voyager 2, secondo i quali la ionizzazione della corona di idrogeno neutro circostante Urano costituisce una delle principali fonti per la componente ionica a bassa energia [56, 59, 60].

5.1.7 Analisi Termica della Popolazione Elettronica

La prima parte dell'analisi si conclude con l'esame della temperatura elettronica (T_e), un parametro diagnostico altrettanto importante per comprendere l'origine e l'evoluzione del plasma. La Figura 5.9 mostra le mappe di T_e lungo la traiettoria di Voyager 2, utilizzando nuovamente proiezioni meridiane ed equatoriali su scale logaritmiche e lineari per evidenziare le diverse popolazioni di plasma.

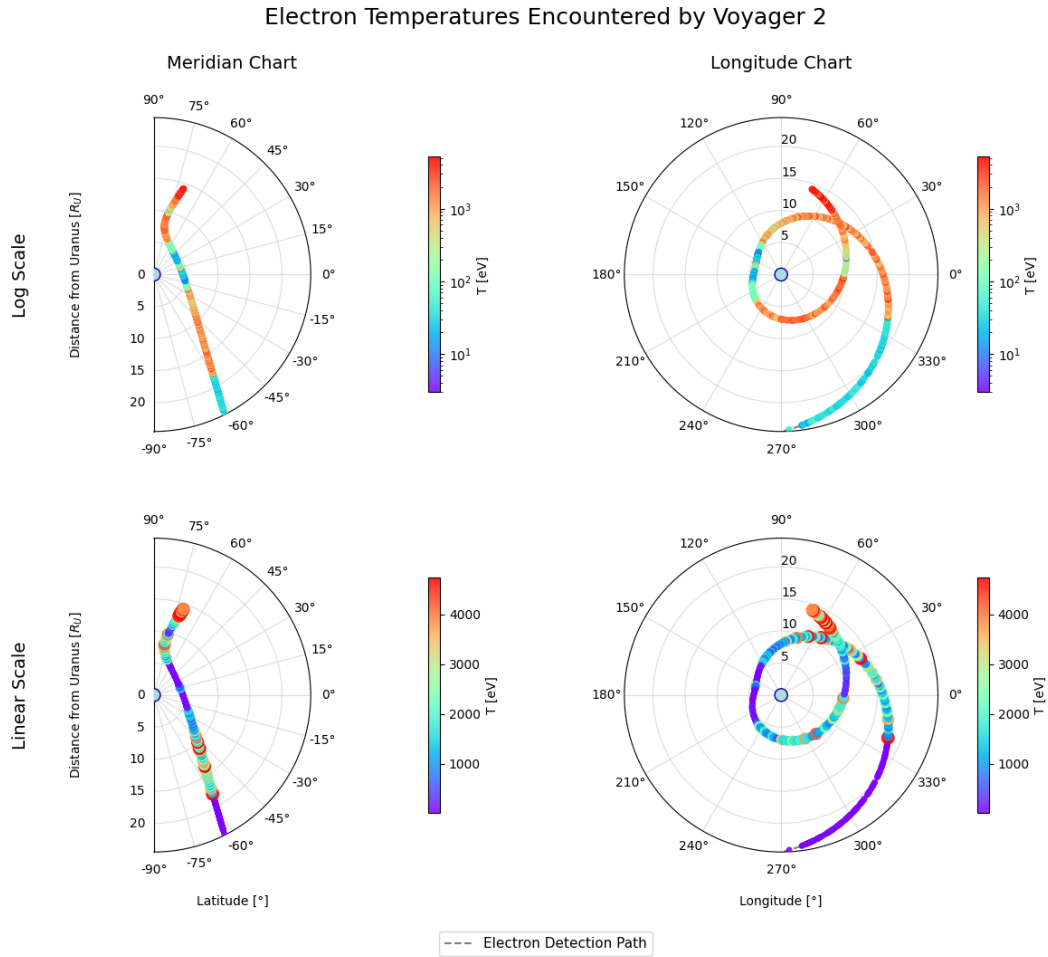


Figura 5.9: Rappresentazione delle temperature elettroniche rilevate da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. Nelle rappresentazioni lineari, i valori sono stati normalizzati limitando l'impatto degli outlier e la dimensione dei marker scalata proporzionalmente ai dati per evidenziarne la distribuzione. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

Struttura Generale e Contributo delle Diverse Scale

Le mappe di temperatura rivelano una struttura magnetosferica nettamente divisa in due regioni con proprietà termiche distinte.

- Scala Logaritmica (pannelli superiori): Questa rappresentazione è essenziale per apprezzare l'elevata escursione termica. Si osserva un gradiente radiale positivo: il plasma è freddo nella regione interna (colori viola/blu, $T_e \approx 1 - 10$ eV) e diventa progressivamente più caldo allontanandosi dal pianeta, raggiungendo temperature di migliaia di elettronvolt (keV, colori arancione/rosso) a distanze superiori a $10 R_U$.
- Scala Lineare (pannelli inferiori): Questa scala, pur saturando nelle regioni a temperatura più elevata, risulta particolarmente efficace nell'isolare la componente di plasma freddo. L'analisi evidenzia che la porzione interna investigata presenta caratteristiche termiche relativamente omogenee, con valori dell'energia elettronica significativamente inferiori ($T_e \ll 1000$ eV).

La caratteristica più significativa e fisicamente rivelatrice di queste mappe emerge dal confronto con le mappe di densità (Figure 5.5 e 5.7). Si osserva nello specifico una chiara e robusta anti-correlazione tra la densità elettronica e la sua temperatura. Le regioni di massima densità ($n_e > 1 \text{ cm}^{-3}$) corrispondono direttamente alle regioni di minima temperatura $T_e \approx 1$ eV. Viceversa, dove la densità diminuisce, la temperatura aumenta conseguentemente. Questo complesso legame, in analogia con quanto osservato nel sistema di Saturno [61] e Giove [62], potrebbe essere interpretato come la tipica firma di una sorgente di plasma locale e continua. Un plasma "nuovo", generato dallo sputtering di una superficie ghiacciata (come una luna o particelle di un anello) o dalla fotoionizzazione di un gas neutro, nasce freddo. L'accumulo di questo plasma freddo in una regione confinata porta ad un aumento della densità. Il plasma più vecchio, che ha avuto il tempo di diffondere verso l'esterno e di essere energizzato dai processi magnetosferici (es. riscaldamento da onde, accelerazione per co-rotazione), diventa caldo e più rarefatto.

Correlazione Spaziale con Orbite Lunari

Nuovamente la sovrapposizione delle orbite lunari (Figura 5.10) permette di meglio comprendere il ruolo delle lune all'interno dell'ambiente plasmatico.

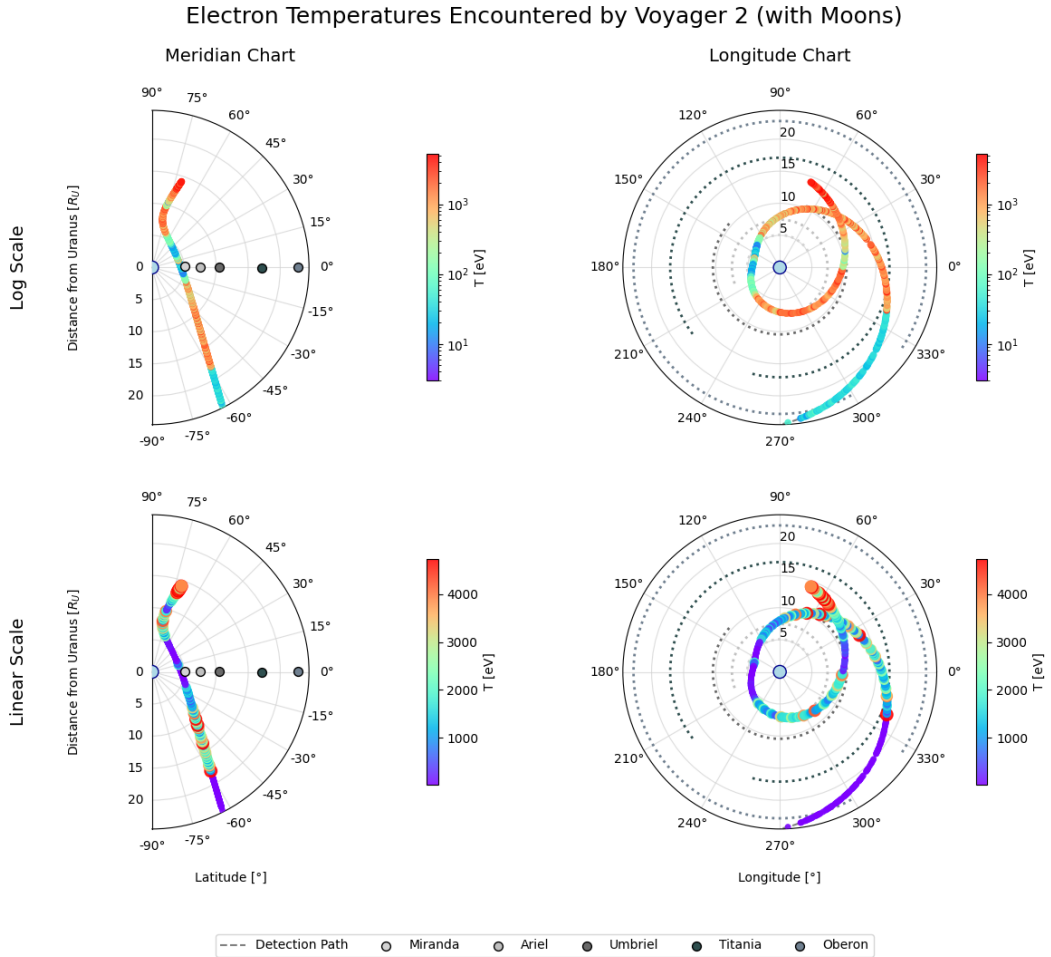


Figura 5.10: Rappresentazione della correlazione fra le temperature elettroniche rilevate da Voyager 2 durante il sorvolo di Urano e la posizione delle principali lune uraniane. Pannello complessivo con esposizione dei valori in formato logaritmico e lineare. Nelle rappresentazioni lineari, i valori sono stati normalizzati limitando l'impatto degli outlier e la dimensione dei marker scalata proporzionalmente ai dati per evidenziarne la distribuzione. La scala di colore adottata per la rappresentazione è mostrata nel grafico

Come si evince dal grafico, l'orbita di Miranda ($R \approx 5.2 R_U$) si colloca in prossimità della transizione termica, caratterizzata da un marcato gradiente che separa le regioni a plasma relativamente più freddo da quelle a temperatura maggiore [56]. Tale configurazione risulta coerente con l'identificazione del cosiddetto *plasma sheet inner edge*, dove si registra l'attenuazione delle componenti elettroniche supratermiche [60]. Sebbene la vicinanza spaziale abbia inizialmente suggerito un possibile ruolo diretto del satellite nel definire tale confine [56], studi più approfonditi ne hanno escluso l'origine da meccanismi di sweeping satellitare, attribuendo invece la separazione delle popolazioni elettroniche a processi di schermatura del campo elettrico di convezione magnetosferica [60]. In tale contesto, Miranda può comunque influenzare localmente la distribuzione del plasma, contribuendo a modificare gli spettri energetici o a favorire fenomeni di termalizzazione su scala limitata, senza tuttavia costituire la causa primaria della transizione. Le orbite di Ariel ($\approx 7.5 R_U$) e Umbriel ($\approx 10.5 R_U$) ricadono invece pienamente nella regione in cui il plasma risulta più caldo e meno denso ($T_e > 100$ eV). In queste condizioni, eventuali contributi di plasma freddo generati dalle interazioni luna-plasma costituirebbero una perturbazione limitata rispetto alla popolazione elettronica di fondo; ciò potrebbe renderne difficile l'identificazione diretta, pur lasciando indizi nei picchi locali di densità osservati, in particolare nel caso di Umbriel.

Sintesi dell'Interpretazione

L'analisi combinata di temperatura e densità elettronica conferma la presenza di popolazioni di plasma relativamente freddo nelle regioni interne della magnetosfera di Urano. Il confine tra plasma freddo e caldo coincide spazialmente con l'orbita di Miranda, in accordo con le osservazioni iniziali [56] e con le analisi dettagliate del problema [60]. Tuttavia, come evidenziato dalle fonti letterarie [56, 60], Miranda non è la causa della separazione tra le popolazioni elettroniche; il confine è stabilito dai processi di convezione magnetosferica e dal fenomeno di schermatura del campo elettrico. In questo contesto, la luna esercita comunque un'influenza locale significativa indicando che, pur non generando il confine principale, Miranda può modulare le caratteristiche del plasma nella sua immediata vicinanza.

5.2 Analisi delle Variazioni di Densità tramite Fitting Numerico

Come già più volte ribadito, l'analisi delle variazioni spaziali della densità plasmatica rappresenta il nucleo interpretativo di questo lavoro. A partire dalle rappresentazioni descritte nella sezione precedente, si è osservato come i valori di densità non mostrino un andamento monotono con la distanza dal pianeta, ma presentino irregolarità locali potenzialmente riconducibili a processi di interazione tra il plasma magnetosferico e le lune interne del sistema uraniano. L'attenzione è stata in particolare rivolta a Miranda e Umbriel, due satelliti che, per la loro collocazione orbitale e dimensioni, possono rappresentare sorgenti o zone di perturbazione della popolazione di plasma. Per verificare quantitativamente le ipotesi formulate nella sezione precedente, è stato quindi condotto uno studio di fitting numerico della densità plasmatica in funzione della distanza radiale da Urano (Figura 5.1). L'obiettivo dell'analisi era

quello di individuare eventuali deviazioni sistematiche rispetto all'andamento medio e di valutarne la possibile correlazione con le posizioni orbitali delle lune Miranda e Umbriel.

5.2.1 Metodologia del Fitting

L'intero processo è stato sviluppato in ambiente Python, avvalendosi delle potenzialità di librerie scientifiche consolidate quali **Pandas** per la manipolazione dei dati, **NumPy** per le operazioni numeriche, **Matplotlib** per la visualizzazione grafica e, in modo cruciale, **SciPy** per l'analisi statistica e l'algoritmo di fitting.

Il flusso metodologico può essere suddiviso nelle seguenti fasi operative:

1. Pre-elaborazione e Preparazione dei Dati

Le procedure di pre-elaborazione e preparazione dei dati sono state le medesime descritte in precedenza (vedi 4.4), una scelta metodologica distintiva rispetto a quanto già svolto è stata invece la segmentazione del dataset. I dati sono stati suddivisi secondo due criteri ben distinti:

- Traiettoria della sonda: basandosi sull'istante di massima vicinanza (Closest Approach, C/A), le informazioni contenute nel dataframe principale sono state separate in due sottoinsiemi distinti: inbound (fase di avvicinamento al pianeta) e outbound (fase di allontanamento). Questa suddivisione è stata motivata dalla possibilità che la sonda attraversando le regioni magnetiche e plasmatiche avesse potuto osservare caratteristiche fisiche differenti nelle due fasi del flyby (analogamente a quanto accaduto nel corso dell'indagine dell'ambiente plasmatico gioviano [54]).
- Popolazione elettronica: All'interno di ciascun sottoinsieme (inbound/outbound), è stata operata un'ulteriore distinzione tra la popolazione elettronica "fredda" e quella "calda". Poiché queste due popolazioni hanno tipicamente origini, temperature e dinamiche diverse, analizzarle separatamente ha permesso di isolare i contributi specifici di ciascuna ai fenomeni di interazione osservati.

2. Analisi Preliminare della Distribuzione dei Dati

Prima di procedere con la modellizzazione, è stata condotta un'analisi statistica per investigare la natura della distribuzione dei valori di densità. Questa analisi si è rivelata cruciale per comprendere le proprietà intrinseche dei dati e orientare le scelte successive. A tal fine, sono stati impiegati tre strumenti diagnostici:

- Istogramma di Frequenza: Una rappresentazione grafica per valutare visivamente la forma, la simmetria e la centralità della distribuzione;
- Q-Q Plot (Quantile-Quantile Plot): Generato tramite la funzione `stats.probplot` di **Scipy**, questo grafico confronta i quantili della distribuzione dei dati campionari con i quantili di una distribuzione normale teorica. Una deviazione sistematica dei punti dalla linea di riferimento ($y=x$) indica una non aderenza al modello gaussiano.

- Test di Normalità Statistici: Sono stati eseguiti due test d'ipotesi formali per verificare la normalità:
 - Test di Shapiro-Wilk (`scipy.stats.shapiro`): Valuta l'ipotesi nulla (H_0) che i dati provengano da una popolazione normalmente distribuita. Un p-value basso (tipicamente < 0.05) porta al rigetto dell'ipotesi nulla [63, 64].
 - Test di D'Agostino e Pearson (`scipy.stats.normaltest`): Anch'esso testa l'ipotesi di normalità, basandosi su misure di asimmetria (skewness) e curtosi (kurtosis) della distribuzione [65, 66].

ID Dataset	W	p_W	K^2	p_{K^2}	α	Esito (H_0)
MIH	0.463	6.74×10^{-23}	197.79	1.12×10^{-43}	0.05	Rifiutato
MIC	0.957	2.46×10^{-5}	13.80	1.01×10^{-3}	0.05	Rifiutato
MOH	0.655	1.82×10^{-13}	75.41	4.21×10^{-17}	0.05	Rifiutata
MOC	0.711	2.73×10^{-13}	45.42	1.37×10^{-10}	0.05	Rifiutato
UIH	0.836	9.66×10^{-12}	35.19	2.28×10^{-8}	0.05	Rifiutato
UOH	0.836	1.14×10^{-4}	18.21	1.11×10^{-4}	0.05	Rifiutato
UOC	0.922	1.62×10^{-2}	10.17	6.19×10^{-3}	0.05	Rifiutato

Tabella 5.1: Risultati dei test di normalità (Shapiro-Wilk e D'Agostino-Pearson) per i dataset analizzati. Legenda ID: **M**=Miranda, **U**=Umbriel; **I**=Inbound, **O**=Outbound; **H**=Popolazione Calda, **C**=Popolazione Fredda. Soglia di significatività $\alpha = 0.05$.

L'esito di queste analisi ha evidenziato una prevalente eterogeneità nelle distribuzioni di densità elettronica. Sebbene la componente fredda rilevata durante la fase di Inbound presso Miranda approssimi un comportamento quasi-gaussiano ($W \approx 0.957$), la maggior parte dei dataset analizzati mostra scostamenti significativi dall'ipotesi di normalità ($p_{\text{value}} > 0.05$). In particolare, le popolazioni calde e le rilevazioni nell'intorno di Umbriel sono caratterizzate da una marcata asimmetria positiva e dalla presenza di code di distribuzione estese (valore K^2), riconducibili sia alla natura fisica del plasma (fluttuazioni intermittenti) sia, nel caso di Umbriel, al regime di bassa statistica dovuto all'estrema rarefazione dell'ambiente. Tali evidenze hanno dunque suggerito che l'impiego di stimatori classici sarebbe potuto risultare poco rappresentativo della dinamica prevalente nell'osservazione dei fenomeni; sono state quindi adottate tecniche di stima più robuste e approcci di fitting non lineari, idonei a trattare la natura non simmetrica dei dati e la presenza di valori estremi.

3. Procedura di Fitting Numerico

Una volta preparati e segmentati i dati, il passo successivo è consistito nell'applicare un modello matematico per interpretare quantitativamente le variazioni osservate. Un passaggio preliminare importante, prima del fitting vero e proprio, è stato volto a mitigare l'influenza di valori anomali (outlier) che avrebbero potuto distorcere il

risultato. In virtù del carattere marcatamente asimmetrico della distribuzione dei dati, evidenziato nell'analisi precedente, si è scartato un approccio basato su media e deviazione standard, optando per un metodo più robusto basato sull'intervallo interquartile (IQR - Interquartile Range). Sono stati identificati e rimossi tutti i punti che ricadevano al di fuori dell'intervallo:

$$[Q_1 - 1.5 \cdot \text{IQR}, Q_3 + 1.5 \cdot \text{IQR}],$$

dove Q_1 e Q_3 rappresentano rispettivamente il primo e il terzo quartile della distribuzione, mentre

$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1$$

indica l'intervallo interquartile. Questa operazione ha permesso di ottenere un dataset più pulito e rappresentativo dell'andamento generale del plasma, senza essere influenzato da singole misure estreme. Con un dataset così raffinato, l'attenzione è stata quindi focalizzata sulle regioni di interesse, ovvero su "finestre" di dati radiali circoscritte alle posizioni orbitali di Miranda e Umbriel. Per modellare i profili di densità all'interno di questi intervalli, si è fatto ricorso alla funzione `scipy.optimize.curve_fit` [67]. Questa potente funzione applica un algoritmo di minimizzazione dei minimi quadrati non lineari, ottimizzato sul metodo Levenberg-Marquardt (opzione `method='lm'`) [67], cercando i parametri di una funzione matematica (definita dall'utente) che meglio approssimano la nuvola di punti sperimentali. Il modello matematico scelto per rappresentare queste variazioni locali è stato, nella maggior parte dei casi, la funzione gaussiana. Tale scelta, sebbene le analisi statistiche abbiano evidenziato la non normalità delle distribuzioni globali dei dati, risulta comunque appropriata in questo contesto. L'utilizzo della funzione gaussiana, infatti, non è legato all'ipotesi che i valori campionati seguano una distribuzione probabilistica normale, bensì rappresenta una scelta morfologica locale: essa fornisce una forma caratteristica efficace per descrivere strutture spazialmente concentrate (picchi o depressioni di densità) lungo la traiettoria. In questo quadro, i parametri del fit — ampiezza, posizione radiale e larghezza della gaussiana — assumono quindi un significato fisico diretto, consentendo di quantificare l'intensità della perturbazione, la sua localizzazione e l'estensione spaziale associata. Tale approccio è coerente con i modelli di trasporto e diffusione, secondo i quali profili gaussiani costituiscono una soluzione approssimata dell'evoluzione di strutture localizzate in ambienti di plasma, indipendentemente dal comportamento statistico globale della distribuzione dei dati [68].

4. Criteri di Valutazione della Bontà del Fit

La validità e l'affidabilità di ciascun fit sono state valutate secondo un approccio multi-criterio:

- **Analisi Visiva:** La prima valutazione, qualitativa, consiste nell'ispezionare graficamente la sovrapposizione tra la curva del modello e i punti sperimentali.
- **Analisi dei Residui:** I residui, definiti come la differenza tra i dati osservati e i valori predetti dal modello, sono stati analizzati per verificare l'assenza di pattern sistematici. Un buon fit è caratterizzato da residui piccoli e distribuiti

casualmente attorno allo zero. Per una valutazione quantitativa, è stata inoltre calcolata la media μ dei residui, insieme al valore R.M.S. (Root Mean Square), indicato nei grafici con la lettera greca σ . Valori di μ prossimi a zero e di σ contenuti indicano un buon accordo tra il modello e i dati osservati.

- Coefficiente di Determinazione (R^2): Questo indice statistico misura la proporzione della varianza della variabile dipendente (densità) spiegata dal modello. È calcolato come:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{res}}}{SS_{\text{tot}}}$$

con:

$$SS_{\text{res}} = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2, \quad SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

dove y_i rappresentano i dati osservati, $f(x_i)$ i corrispondenti valori stimati dal modello e $\bar{y}$ la media dei dati osservati. Il valore di R^2 è stato valutato esclusivamente sulla regione di fit, poiché il modello è stato formulato per descrivere localmente il comportamento del picco osservato. Pertanto, un valore di R^2 prossimo a 1 indica un buon accordo tra modello e dati limitatamente all'intervallo analizzato, mentre non implica necessariamente una capacità predittiva del modello al di fuori di tale regione.

- Rapporto Segnale-Rumore (S/N) dei Parametri: Per valutare l'attendibilità statistica dei parametri ottenuti dal fit (es. ampiezza, media della gaussiana), è stato calcolato il loro rapporto segnale-rumore. La funzione `curve_fit` restituisce, oltre ai valori ottimali dei parametri, anche la loro matrice di covarianza. L'errore standard su ciascun parametro è dato dalla radice quadrata degli elementi sulla diagonale di tale matrice. Il S/N per un dato parametro è quindi calcolato come il rapporto tra il valore del parametro e il suo errore standard. Un S/N elevato (convenzionalmente > 3) suggerisce che il parametro è ben definito dai dati e statisticamente significativo, e non un mero artefatto del rumore di fondo.

L'applicazione sistematica di questa metodologia a tutti i sottoinsiemi di dati ha permesso di identificare e quantificare le perturbazioni di densità, i cui risultati verranno discussi in dettaglio nelle sezioni successive.

5.3 Traiettoria di Inbound: Presentazione dei Risultati

La prima parte dell'analisi ha riguardato i dati acquisiti durante la fase di inbound della traiettoria, ossia l'avvicinamento della sonda al pianeta. L'esposizione dei risultati ottenuti verrà inizialmente articolata distinguendo tra i casi relativi alla popolazione elettronica calda e a quella fredda; successivamente, verranno approfondite le osservazioni nelle regioni in prossimità delle lune oggetto di studio, Miranda e Umbriel.

5.3.1 Popolazione Calda

Miranda

L'applicazione della metodologia di fitting alla popolazione elettronica “calda” durante la fase di avvicinamento (inbound) ha evidenziato risultati particolarmente rilevanti nella regione radiale situata all'interno dell'orbita di Miranda.

Un'ispezione visiva preliminare dei dati (Figura 5.11) mostrava già un andamento non monotono, con un accumulo di densità in un intervallo compreso tra 4.2 e 4.8 R_U , seguito da un brusco calo in prossimità della posizione orbitale del satellite.

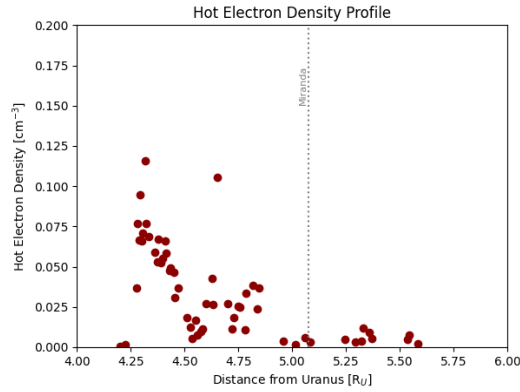


Figura 5.11: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica calda intorno a Miranda. Dati relativi alla traiettoria di Inbound

Per quantificare questa struttura complessa, si è reso necessario un modello più sofisticato di una singola curva. È stato quindi implementato un fit basato sulla sovrapposizione di tre componenti gaussiane, i cui risultati sono illustrati nella figura 5.12:

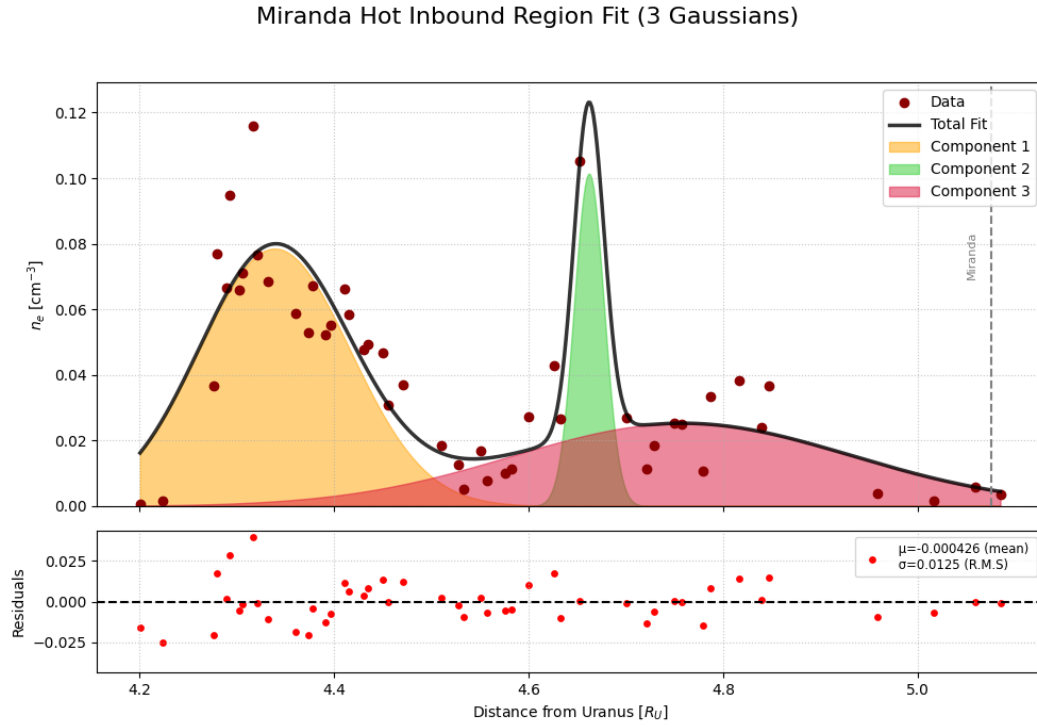


Figura 5.12: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
G1	Ampiezza	0.07854	0.005376	0.06845	0.08
	Centro	4.339	0.006929	0.001597	4.33
	Larghezza	0.07752	0.009158	0.1181	0.07
G2	Ampiezza	0.1015	0.04161	0.41	0.03
	Centro	4.662	0.01015	0.002176	4.6
	Larghezza	0.01531	0.004496	0.2937	0.1
G3	Ampiezza	0.02525	0.00496	0.1964	0.02
	Centro	4.757	0.05192	0.01091	4.75
	Larghezza	0.1749	0.05447	0.3114	0.1
Numeri di Punti del Fit					
Punti		48			
Statistiche dei residui					
Media residui		-0.000426			
Media residui/Media Dati		0.0111			
R.M.S. residui		0.0125			
R.M.S. residui/Media Dati		0.325			
Coefficiente di determinazione					
R ²		0.8095			

Tabella 5.2: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione hot inbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

Il modello composito dimostra una buona capacità descrittiva dei dati sperimentali, come indicato dal coefficiente di determinazione $R^2 \approx 0.81$. Tale valore, unitamente all'analisi dei residui (pannello inferiore della figura), che risultano distribuiti in modo approssimativamente casuale attorno allo zero e privi di strutture sistematiche, suggerisce che il modello a tre componenti riesce a rappresentare in maniera coerente le principali caratteristiche del fenomeno osservato. L'analisi dei singoli componenti del fit permette di scomporre il profilo di densità in tre distinte strutture, ciascuna con caratteristiche specifiche:

- **Componente 1 (G1):** La prima gaussiana, centrata a $4.34 \pm 0.01 R_U$, descrive un incremento di densità relativamente ampio (ampiezza $\approx 0.08 \text{ cm}^{-3}$). I parametri di fit (ampiezza, posizione e larghezza) presentano un rapporto segnale-rumore (S/N) superiore a 8, indicando una solida affidabilità statistica. Tale struttura rappresenta la componente principale del profilo radiale, associabile a un accumulo di plasma caldo localizzato internamente all'orbita di Miranda.
- **Componente 2 (G2):** Sovrapposta alla precedente, si identifica una seconda componente estremamente stretta, centrata a $4.66 \pm 0.01 R_U$ con una larghezza di circa $0.015 R_U$. La posizione è definita con elevata accuratezza ($S/N > 450$), mentre l'ampiezza mostra una significatività statistica più contenuta ($S/N \approx 2.44$), suggerendo cautela nell'interpretazione del valore assoluto. Nonostante ciò, la presenza di una struttura così localizzata, in analogia con modellazioni magnetosferiche di Saturno [69], risulta compatibile con l'eventuale formazione di un filamento di plasma o con un processo di compressione radiale altamente confinato.
- **Componente 3 (G3):** La terza componente, prossima all'orbita della luna, è descritta da una gaussiana più ampia e meno intensa, centrata a $4.76 \pm 0.05 R_U$. In questo caso, i parametri mostrano un rapporto S/N superiore a 3.2, indicando una significatività statistica moderatamente robusta. Tale feature potrebbe essere associata a una regione di densità lievemente aumentata che si estende in prossimità della zona d'influenza gravitazionale di Miranda [56].

La disposizione spaziale delle tre componenti rispetto all'orbita di Miranda (circa $5.07 R_U$) risulta coerente con l'ipotesi di una possibile interazione luna-plasma. In particolare, si osserva una sequenza caratterizzata da un'area di incremento della densità (compatibile con un possibile fenomeno di accumulo o compressione del plasma) situata appena all'interno dell'orbita lunare, ossia nella regione upstream rispetto al sistema corotante. A questa fase segue una marcata diminuzione della densità, localizzata in prossimità e oltre la traiettoria orbitale della luna.

Questo scenario è coerente con il modello in cui Miranda agisce come ostacolo al plasma magnetosferico, generando effetti di spazzamento (*sweeping*) sul flusso. In questo contesto, il plasma che incontra la luna può essere deflesso o spostato a valle, formando una scia (wake) a distanze radiali maggiori. La regione di densità molto bassa attraversata dalla sonda a circa $5.07 R_U$ può quindi essere interpretata come l'ingresso nella scia plasmatica di Miranda. Le strutture di densità più elevate (G1, G2, G3) rilevate a distanze minori rispetto all'orbita della luna potrebbero

rappresentare il plasma “rallentato” e compresso a monte dell’ostacolo, nella cosiddetta regione di pre-interazione (precursor region). Studi su altri sistemi planetari supportano questa interpretazione: simulazioni ibride tridimensionali della scia di Rhea mostrano che una luna può fungere da ostacolo per il plasma corotante, creando dietro di sé una regione a densità ridotta [69]. Inoltre, dati osservativi e modellistici sempre relativi a Saturno indicano che sorgenti interne di plasma, come lune o anelli, possono generare pressione interna sufficiente a modificare la configurazione magnetosferica [70]. Nel contesto di Urano, seppur molto diverso da quello di Saturno, questi esempi rendono plausibile il comportamento osservato: Miranda potrebbe deflettere o assorbire il plasma corotante, producendo una scia a valle e un accumulo a monte. La complessità della regione, che richiede tre gaussiane per essere modellata, suggerisce che l’interazione non si limita a un semplice accumulo, ma potrebbe includere fenomeni dinamici più complessi, quali onde o instabilità generate dalla stessa interazione luna–plasma, analogamente a quanto osservato nella scia di Rhea [69].

Umbriel

L’analisi del profilo di densità elettronica durante la fase di inbound in prossimità dell’orbita di Umbriel offre un contrasto significativo con le interazioni osservate in altre regioni della magnetosfera uraniana. I dati raccolti dallo strumento PLS, relativi esclusivamente alla popolazione calda, rivelano un ambiente di plasma estremamente rarefatto e privo di strutture macroscopiche ben definite. L’ispezione visiva del profilo di densità (Figura 5.13) in funzione della distanza radiale non mostra alcuna delle firme caratteristiche di interazione, come picchi di compressione o valli di assorbimento, che hanno motivato l’impiego di fitting numerici in altri contesti.

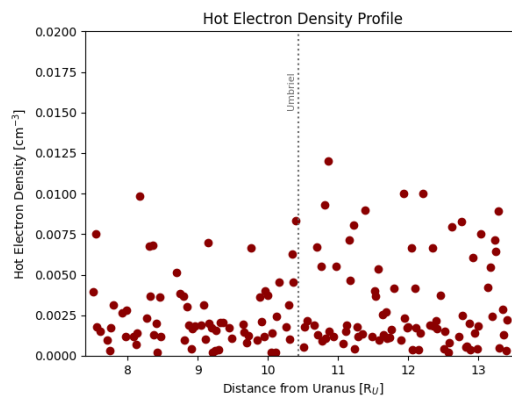


Figura 5.13: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica calda intorno a Umbriel. Dati relativi alla traiettoria di Inbound

Considerata la natura del segnale, caratterizzato da valori di densità sistematicamente molto bassi e da una distribuzione priva di strutture distinguibili, si è ritenuto metodologicamente più appropriato non procedere con un fitting numerico in questa regione. In assenza di picchi o variazioni coerenti e riproducibili, un tentativo di modellizzazione avrebbe comportato un elevato rischio di estrarre artefatti statistici o di attribuire significato fisico a fluttuazioni casuali, soprattutto se confrontato con

le più chiare strutture identificate durante il passaggio outbound. Di conseguenza, l'analisi è stata condotta mediante un approccio descrittivo e statistico, finalizzato alla caratterizzazione dell'ambiente di plasma di fondo e alla rilevazione di eventuali fenomeni transienti. In tal senso, la scelta di evitare un fit non rappresenta una limitazione metodologica, bensì una strategia intenzionale volta a non sovra-interpretare variazioni numeriche prive di evidenza fisica.

Analisi Statistica della Regione	
Media	0.00291
R.M.S.	0.00389

Tabella 5.3: Risultati dell'analisi statistica inerenti il profilo di densità elettronica nella regione hot inbound di Umbriel

La regione risulta caratterizzata da una densità di fondo mediamente molto bassa, pari a circa 0.003 cm^{-3} , con fluttuazioni dello stesso ordine di grandezza; un risultato coerente con le misure in situ della Voyager 2, le quali descrivono un plasma estremamente tenue e privo di contributi significativi da parte dei satelliti uraniani [56]. All'interno di questo plasma quiescente non sono state individuate evidenze robuste di interazione stabile o strutturata riconducibili alla presenza di Umbriel. Tuttavia, l'analisi puntuale dei dati mette in luce la comparsa di eventi transienti e spazialmente non risolti. Il più rilevante si osserva a una distanza radiale di $10.86 R_U$, dove la densità presenta un incremento istantaneo fino a circa 0.012 cm^{-3} , ovvero un valore quasi quattro volte superiore alla media locale, per poi tornare rapidamente ai livelli di fondo. Da un punto di vista fisico, tale comportamento risulta compatibile con l'ipotesi che, durante la fase di avvicinamento della sonda nei pressi di Umbriel, non sia stata intercettata una scia strutturata né una regione di compressione su larga scala – confermando un ambiente con dinamica locale episodica piuttosto che interazioni persistenti [71]. L'ambiente attraversato appare sostanzialmente rarefatto e gli enhancement di densità isolati e di breve durata potrebbero essere interpretati come attraversamenti di sottili filamenti di plasma o di fenomeni locali. In particolare, sebbene il PLS non sia in grado di rilevare direttamente eventi energetici, la presenza documentata di iniezioni protoniche in prossimità dell'orbita di Umbriel [71] suggerisce che la regione possa essere soggetta a dinamiche transitorie, potenzialmente in grado di generare perturbazioni anche nel plasma termico. Tali variazioni, pur essendo localizzate e fugaci, non sembrerebbero costituire la firma di un'interazione globale e persistente con la luna. La mancata osservazione di una perturbazione estesa rappresenta comunque un risultato scientificamente significativo, specialmente considerando le condizioni estreme del mezzo. In sintesi, l'analisi del segmento di inbound in prossimità di Umbriel definisce un importante riferimento di base per l'indagine dell'interazione: in questa specifica fase dell'incontro, la luna non mostra effetti chiaramente misurabili sul plasma caldo circostante tramite l'utilizzo del PLS. Il comportamento osservato è dominato dalla bassissima densità di fondo e dalla presenza di fenomeni transienti e fortemente localizzati, la cui origine sembra più probabilmente riconducibile alla dinamica interna della magnetosfera piuttosto che a un'interazione diretta con il corpo satellitare.

5.3.2 Popolazione Fredda

Miranda

L'analisi della popolazione elettronica "fredda" durante la fase di inbound rivela una dinamica ancora più complessa e strutturata rispetto a quella calda. Il profilo di densità (Figura 5.14) sembra essere dominato da due feature principali: un'alta densità a distanze radiali inferiori che decresce rapidamente, formando una sorta di "parete" di plasma e una struttura secondaria di picco e avvallamento immediatamente a ridosso dell'orbita di Miranda.

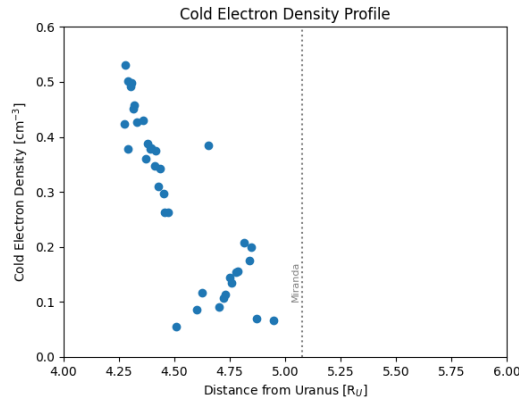


Figura 5.14: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica fredda intorno a Miranda. Dati relativi alla traiettoria di Inbound

Data la complessità del profilo osservato, si è adottato un approccio di fitting procedurale articolato in due fasi, volto a decomporre e interpretare le diverse componenti. Nella fase iniziale, l'analisi è stata focalizzata sull'intervallo compreso tra 4.6 e 5.0 R_U , con l'obiettivo di isolare e modellare la struttura di picco che precede la scia di Miranda. Tale feature mostra un comportamento significativamente asimmetrico, caratterizzato da un fronte in ingresso più ripido e da un successivo decadimento graduale. Al fine di descrivere quantitativamente questa configurazione non simmetrica, è stato impiegato un modello a due componenti gaussiane. Il fit preliminare ha evidenziato un'elevata coerenza con i dati sperimentali in tale intervallo, con un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0.85$. L'analisi dei parametri risultanti suggerisce che la struttura possa essere interpretata come composta da:

- **Componente 1 (G1):** Una gaussiana primaria con un picco molto localizzato e relativamente intenso, ampiezza $0.33 \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$ e centro a $4.653 \pm 0.021 R_U$. I parametri di ampiezza e posizione risultano ben determinati dai dati ($S/N > 6.5$), indicando che l'esistenza e la collocazione del picco sono affidabili. Il parametro di larghezza (W2), invece, presenta un'incertezza relativamente elevata ($S/N \approx 1.21$), suggerendo che i dati non consentono di stimarne con precisione l'estensione spaziale e indicando che la struttura potrebbe essere estremamente stretta.

- **Componente 2 (G2):** Una gaussiana secondaria più ampia e meno intensa, centrata a $4.808 \pm 0.017 R_U$, che descrive la "spalla" destra del picco principale. Tutti i parametri di questa seconda gaussiana sono statisticamente significativi ($S/N > 4$), confermando la presenza di una struttura reale e significativa nel profilo di densità.

Una volta ottenuta una caratterizzazione quantitativa affidabile della struttura di picco, i parametri delle due gaussiane sono stati mantenuti costanti e incorporati come componente fissa in un modello più generale, definito ibrido. L'obiettivo di questa seconda fase era descrivere l'intero profilo osservato, combinando la struttura di picco stabilizzata con un modello matematico capace di rappresentare la transizione radiale a distanze inferiori, ovvero la cosiddetta "parete" di plasma. Per quest'ultima è stata impiegata una funzione sigmoide invertita, la cui forma a gradino si presta a descrivere in modo semplice e quantitativo il passaggio da una regione di densità relativamente elevata a una più bassa. Il risultato di questo approccio è riportato nella Figura 5.15:

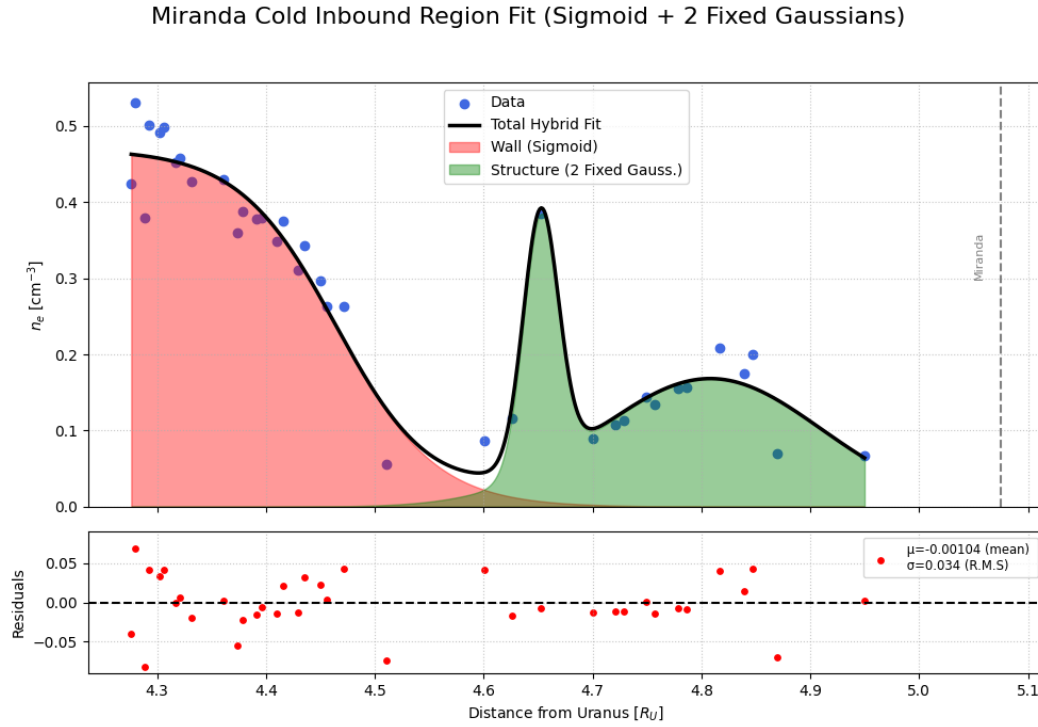


Figura 5.15: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
Sigmoide	Ampiezza	0.4697	0.01671	0.03556	0.5
	Pendenza	22.18	3.788	0.1708	20
	Punto di Mezzo	4.465	0.006652	0.00149	4.5
G1	Ampiezza	0.3329	0.05052	0.1518	0.1
	Centro	4.653	0.02122	0.004561	4.7
	Larghezza	0.01621	0.01343	0.8283	0.2
G2	Ampiezza	0.168	0.01701	0.1012	0.15
	Centro	4.808	0.01675	0.003484	4.8
	Larghezza	0.1018	0.02445	0.2403	0.08
Numeri di Punti del Fit					
Punti		37			
Statistiche dei residui					
Media residui		-0.00104			
Media residui/Media Dati		0.00365			
RMS residui		0.034			
R.M.S. residui/Media Dati		0.119			
Coefficiente di determinazione					
R ²		0.9465			

Tabella 5.4: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione cold inbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

Il modello ibrido mostra un buon adattamento all'intero set di dati, con un coefficiente di determinazione complessivo $R^2 = 0.95$, indicando che la maggior parte della varianza osservata è catturata dal modello. L'analisi dei residui conferma la coerenza del fit, evidenziando scostamenti generalmente minimi e distribuiti in modo casuale, coerenti con l'assenza di pattern sistematici non modellati. Tutti i parametri della componente sigmoide risultano ben determinati dai dati: l'ampiezza della parete è di $0.47 \pm 0.02 \text{ cm}^{-3}$ ($S/N > 28$), la ripidità della discesa è di 22.2 ± 3.8 ($S/N > 5.8$) e il punto di mezzo è localizzato a $4.465 \pm 0.007 R_U$ ($S/N > 670$). Queste stime indicano che le principali caratteristiche della sigmoide sono chiaramente definite nel profilo osservato, con un'elevata affidabilità nella determinazione di posizione e forma.

La decomposizione del profilo di densità della componente di plasma a bassa energia offre una descrizione dettagliata delle variazioni osservate lungo la traiettoria di Voyager 2 e consente di analizzare con maggiore precisione la possibile interazione con Miranda. La regione a densità più elevata (fino a $> 0.5 \text{ cm}^{-3}$) per distanze inferiori a $4.5 R_U$ evidenzia la presenza di plasma relativamente freddo e denso. La successiva diminuzione della densità, descritta dalla funzione sigmoide, è coerente con l'esistenza di un marcato gradiente nelle proprietà del plasma, la cui origine potrebbe essere associata a fenomeni di rilascio di materiale dalle lune interne (ad esempio per outgassing o sputtering) oppure, più probabilmente, a processi di confinamento magnetosferico [56]. Di particolare interesse è la struttura articolata picco-avvallamento rilevata tra tale regione e l'orbita di Miranda. In riferimento a quanto osservato per la popolazione a energia più elevata e sempre in analogia con i modelli di Rhea [69], questa configurazione può essere interpretata come un effetto dell'interazione tra il plasma in corotazione e il satellite. I due contributi gaussiani individuati — un picco stretto a $4.65 R_U$ e uno più ampio a $4.81 R_U$ — risultano coerenti con un potenziale processo di compressione localizzata a monte dell'ostacolo rappresentato da Miranda. La complessità della struttura potrebbe riflettere la presenza di fenomeni non lineari, come onde di prua o instabilità generate dal flusso supersonico del plasma attorno alla luna, pur rimanendo ipotetica la loro natura specifica. A distanze maggiori ($\sim 5.0 R_U$), immediatamente a monte dell'orbita di Miranda, si osserva una riduzione della densità, compatibile con la possibile formazione di una regione di ombra o wake indotta dall'assorbimento locale del plasma da parte del satellite. Questa osservazione coerente con l'ipotesi di interazione per assorbimento già suggerita per la popolazione di plasma più energetica e con i principali risultati della letteratura scientifica [56], estende l'interpretazione a una dinamica che coinvolge anche la componente più fredda.

Umbriel

I dati relativi alla popolazione fredda nella regione prossima a Umbriel, durante la fase di Inbound, non risultano disponibili. Nel processo di estrazione dei dataset, infatti, non sono stati identificati contributi misurabili riconducibili a tale componente in quell'area.

5.4 Traiettoria di Outbound: Presentazione dei Risultati

Conclusa la procedura di fitting dei dati per il segmento di inbound, si è successivamente passati a quelli di outbound.

5.4.1 Popolazione Calda

Miranda

La fase di allontanamento dal pianeta offre una prospettiva complementare sull'interazione tra Miranda e il plasma caldo. Il profilo di densità ottenuto durante il passaggio outbound (Figura 5.16) si discosta in modo evidente da quello osservato nella fase di avvicinamento e mostra una configurazione ben definita.

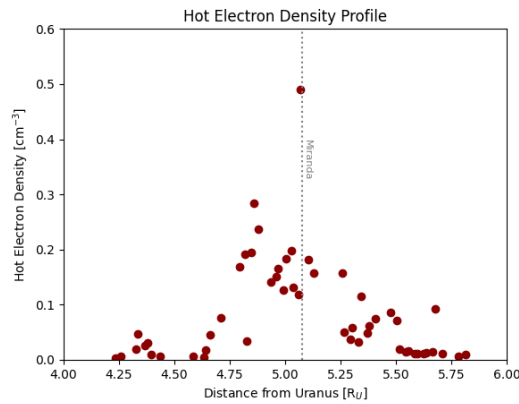


Figura 5.16: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica calda intorno a Miranda. Dati relativi alla traiettoria di Outbound

A distanze radiali maggiori si riscontra una regione quasi costante di plasma a bassa densità (plateau), seguita da una rapida transizione che culmina in un picco pronunciato, localizzato in prossimità dell'orbita di Miranda. La presenza di uno questo singolo punto isolato ($n_e \approx 0.49 \text{ cm}^{-3}$ a $5.07 R_U$), ha portato ad escludere tale contributo dal processo di fitting, al fine di non comprometterne la capacità descrittiva sul profilo globale. Tale scelta metodologica è stata adottata poiché, in assenza di un supporto statistico o morfologico robusto, l'inclusione dello spike avrebbe attribuito un peso eccessivo a una singola misura, generando un adattamento artificiale e potenzialmente fuorviante rispetto alla dinamica di fondo. Si mantiene tuttavia aperta la possibilità che esso rappresenti un fenomeno localizzato fisicamente rilevante, che meriterebbe ulteriori approfondimenti dedicati. In considerazione della natura anomala di questa feature e della distribuzione osservata in questa regione, sono stati pertanto valutati due modelli alternativi per l'analisi.

1. Modello a Gaussiana Asimmetrica (Skewed Gaussian): Questo primo approccio, presentato in Figura 5.17, ha previsto l'impiego di una singola funzione gaussiana asimmetrica per rappresentare l'intero profilo. Il modello ha fornito un livello di adattamento complessivamente soddisfacente ($R^2 = 0.71$); tuttavia, l'analisi dei parametri ha evidenziato una limitazione legata al termine di

asimmetria (α), il cui rapporto segnale-rumore ($S/N \approx 2.44$) risulta inferiore alla soglia comunemente adottata per garantire una stima affidabile ($S/N > 3$). Tale risultato suggerisce che la forma asimmetrica non sia sufficientemente supportata dai dati e che il modello, pur descrivendo la tendenza generale, non offra una caratterizzazione fisicamente vincolata della curva.

2. Modello Ibrido "Gaussiana + Costante": Per affrontare l'indeterminatezza riscontrata nell'approccio precedente, è stato sviluppato un secondo modello (Figura 5.18), costruito con finalità più strettamente interpretative. Il profilo è stato suddiviso in due regioni: per distanze maggiori ($R > 5.15 R_U$) è stata adottata una componente costante, rappresentativa del livello di fondo del plasma, mentre la struttura di picco è stata descritta mediante una funzione gaussiana standard sovrapposta a tale valore di base. Anche se il coefficiente di determinazione in questo caso risulta moderatamente inferiore ($R^2 = 0.60$), tutti i parametri stimati mostrano elevata significatività statistica. Questa caratteristica rende il modello particolarmente adatto a una lettura fisica del profilo, motivo per cui è stato selezionato come riferimento nell'analisi.

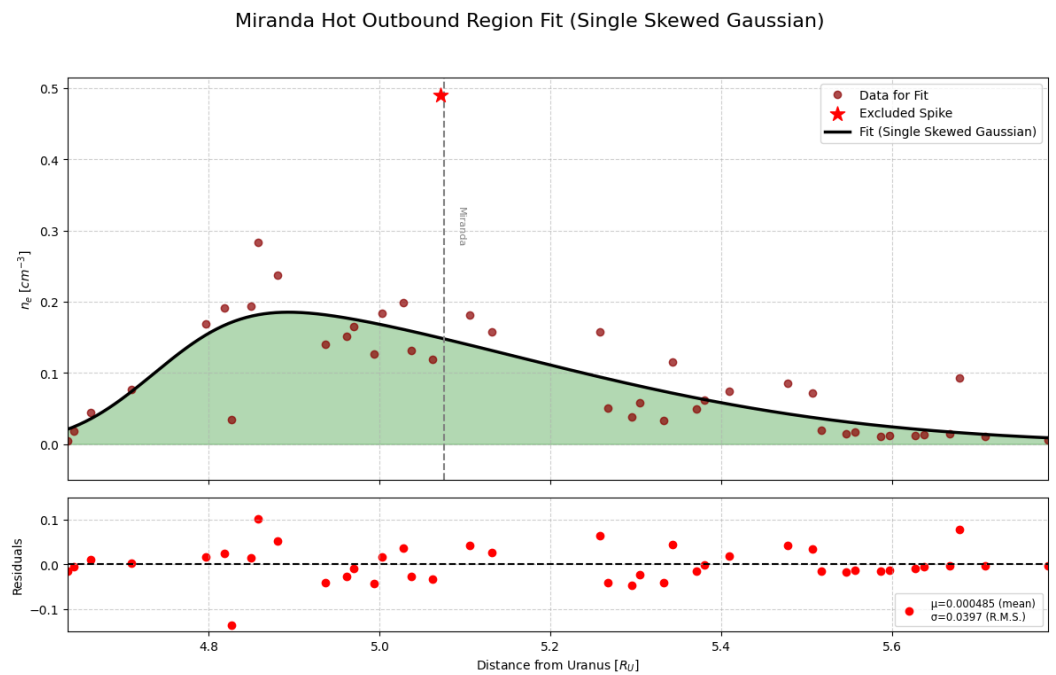


Figura 5.17: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell’accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
Skewed Gaussian	Ampiezza	0.1025	0.009204	0.0898	0.1
	Centro	4.739	0.0254	0.00536	4.9
	Larghezza	0.416	0.04444	0.1068	0.3
	α (Skew)	5	2.048	0.4096	1.5
Numeri di Punti del Fit					
Punti		42			
Statistiche dei residui					
Media residui		-0.000485			
Media residui/Media Dati		0.00532			
RMS residui		0.0397			
R.M.S. residui/Media Dati		0.435			
Coefficiente di determinazione					
R^2		0.7120			

Tabella 5.5: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione hot outbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

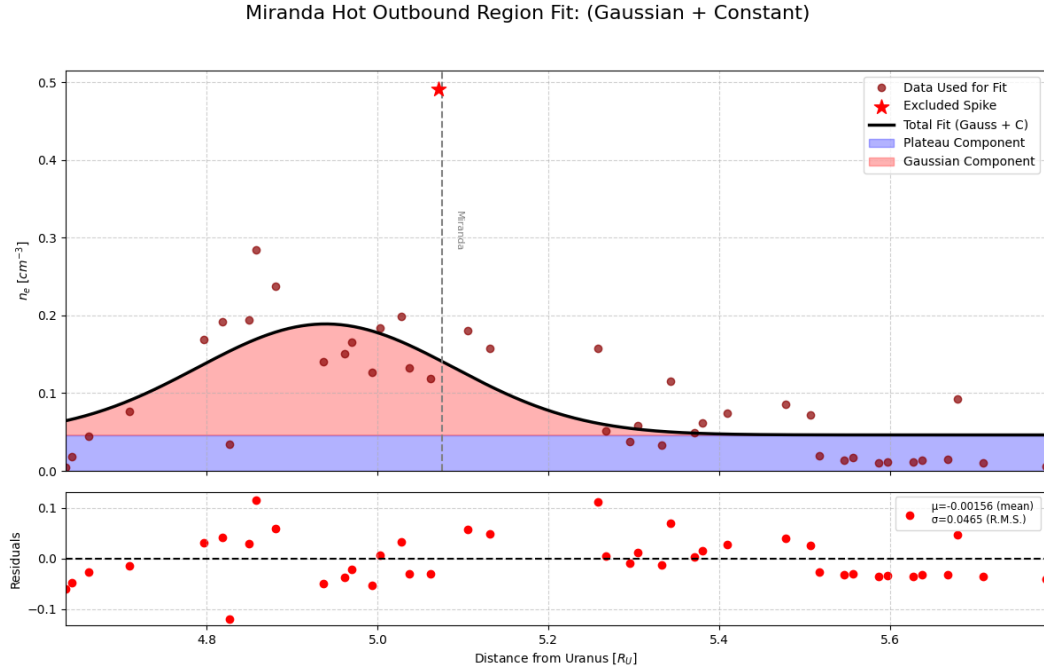


Figura 5.18: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
Plateau	Costante	0.04627			0.05
Gaussiana	Ampiezza	0.1427	0.02224	0.1558	0.15
	Centro	4.939	0.03093	0.006262	4.9
	Larghezza	0.15	0.03989	0.2659	0.1
Numeri di Punti del Fit					
Punti		42			
Statistiche dei residui					
Media residui		-0.00156			
Media residui/Media Dati		0.0171			
RMS residui		0.0465			
R.M.S. residui/Media Dati		0.510			
Coefficiente di determinazione					
R^2		0.6049			

Tabella 5.6: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione hot inbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

La decomposizione del profilo mediante il modello ibrido consente di distinguere e quantificare due componenti principali:

- **Plateau di plasma (componente costante):** Il fit indica un livello di

densità di fondo pari a 0.046 cm^{-3} . Tale valore può essere interpretato come la densità caratteristica del plasma magnetosferico nelle regioni in cui l'influenza di Miranda risulta verosimilmente attenuata o non più predominante lungo la traiettoria della sonda.

- **Picco di uscita dalla scia (componente gaussiana):** Sovrapposta al plateau, è presente una struttura gaussiana con ampiezza incrementale (rispetto al livello di fondo) pari a $0.14 \pm 0.02 \text{ cm}^{-3}$ ($S/N = 6.42$), centrata a $4.94 \pm 0.03 R_U$ ($S/N > 150$). Anche il parametro di larghezza risulta ben determinato ($S/N = 3.76$).

L'interpretazione fisica di questa configurazione risulta in larga parte coerente con quanto osservato nella fase inbound e si colloca in continuità con lo scenario di interazione precedentemente ipotizzato. Procedendo verso distanze radiali maggiori, la traiettoria della sonda suggerisce un progressivo allontanamento dalla regione di influenza di Miranda, verosimilmente associabile alla sua scia di assorbimento. Il picco di densità individuato a $4.94 R_U$ può essere interpretato come potenziale traccia del bordo della wake (wake boundary). In diversi contesti di interazione luna-plasma, come ad esempio per i satelliti galileiani [72], sono stati osservati incrementi localizzati di densità lungo i margini della scia. Questo fenomeno, noto come wake wings o wake brightening, è spesso correlato a processi di compressione o deflessione del flusso plasmatico che aggira l'ostacolo, oppure alla formazione di expansion fans (ventagli di espansione) generati dal gradiente di pressione al limite tra il plasma ambiente e la cavità della scia [73]. In questo quadro, l'elemento escluso dal fitting a $5.07 R_U$ potrebbe rappresentare un evento localizzato in prossimità del centro geometrico della struttura, compatibile con i fenomeni di focalizzazione degli ioni (ion focusing) durante il riempimento della scia (refilling), dove gli effetti compressivi possono generare picchi locali di densità [73]. Tuttavia, rimane necessario un approccio cauto nell'interpretazione trattandosi di un singolo dato non risolto spazialmente. Superata tale regione di potenziamento, la traiettoria rientra in un ambiente che appare compatibile con il plasma magnetosferico meno influenzato dalla presenza del satellite, come suggerito dalla successiva stabilizzazione dei valori di densità sul plateau. Nel complesso, il profilo outbound fornisce un contributo interpretativo complementare rispetto al passaggio inbound e risulta qualitativamente coerente con un'ipotesi di interazione per assorbimento da parte di Miranda, suggerendo l'esistenza di una struttura di bordo della sua scia plasmatica.

Umbriel

A differenza del passaggio inbound, il profilo di densità elettronica rilevato durante la fase outbound in prossimità di Umbriel mostra alcune strutture discernibili che hanno reso possibile un'analisi quantitativa preliminare. È tuttavia importante sottolineare che il dataset disponibile è caratterizzato da un numero limitato di punti di misura (circa 33), il che comporta una densità di campionamento relativamente bassa. Di conseguenza, sebbene l'analisi sia stata condotta con l'intento di esplorare la possibile presenza di firme di interazione, i parametri ottenuti devono essere interpretati con prudenza. Essi forniscono più che altro una stima di primo ordine e una descrizione morfologica preliminare, soggetta a un'incertezza statistica significativa, e non una

rappresentazione definitiva del fenomeno.

L'analisi del profilo di densità della popolazione elettronica calda in prossimità di Umbriel suggerisce una configurazione articolata, indicando la possibile presenza di variabilità locale o di fenomeni transitori meritevoli di valutazione. L'esame dei dati grezzi (Figura 5.19) mostra un andamento non monotono caratterizzato da fluttuazioni di densità sovrapposte a un livello di fondo relativamente basso.

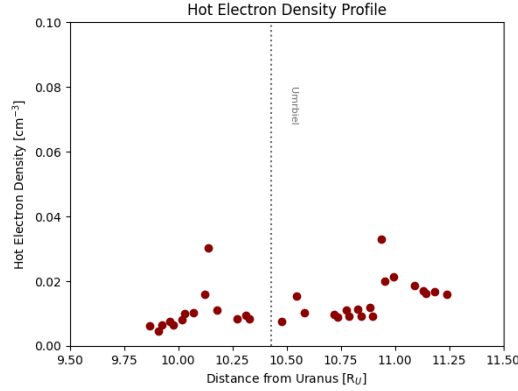


Figura 5.19: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica calda intorno a Umbriel. Dati relativi alla traiettoria di Outbound

Per interpretare tali strutture, è stato applicato un modello ibrido analitico (Figura 5.20) composto da un termine costante di base e due funzioni gaussiane indipendenti. La validità statistica del modello risulta soddisfacente, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.71$, indicativo della capacità descrittiva del modello in considerazione della dispersione intrinseca dei dati di plasma in questa regione. La decomposizione del segnale ha permesso di isolare tre contributi distinguibili, i cui parametri risultano tutti statisticamente significativi ($S/N > 3$):

- **Componente Costante:** Il fit identifica una densità basale costante pari a $C = 0.0087 \pm 0.0010 \text{ cm}^{-3}$ ($S/N = 8.93$), coerente con una popolazione di plasma caldo relativamente stabile nell'intervallo intermedio della magnetosfera di Urano.
- **Componente 1 (G1):** Localizzata a $R \approx 10.15 R_U$, all'interno dell'orbita di Umbriel, emerge una struttura stretta e piccata ("spike"). Sebbene l'ampiezza pari a 0.0258 cm^{-3} presenti significatività statistica marginale ($S/N = 3.04$), la posizione del picco è determinata con elevata precisione ($S/N > 1700$). La larghezza ridotta ($\approx 0.014 R_U$) suggerisce che possa trattarsi di un fenomeno localizzato spazialmente o di natura impulsiva.
- **Componente 2 (G2):** A valle dell'orbita lunare, centrata a $R \approx 11.03 R_U$, si osserva la struttura dominante: un incremento di densità più esteso con ampiezza di 0.0153 cm^{-3} e una larghezza corrispondente a $\approx 0.107 R_U$. Il rapporto $S/N > 5$ per tutti i parametri di questa Gaussiana ne conferma la robustezza fisica.

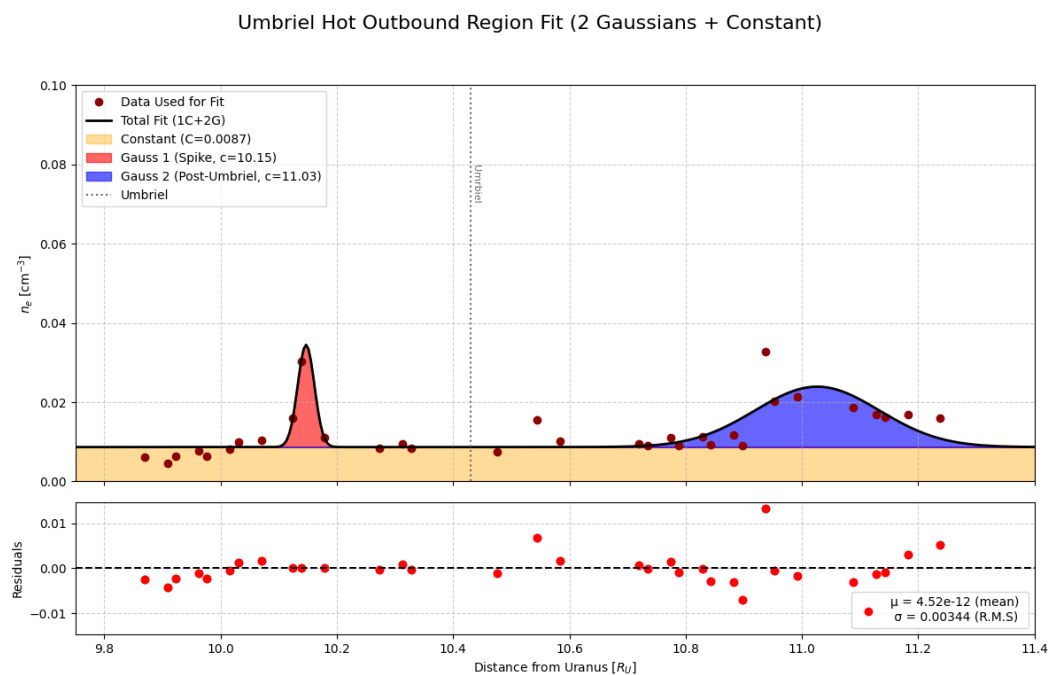


Figura 5.20: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
C0 (Constant Floor)	Costante	0.008674	0.0009713	0.112	0.008
G1	Ampiezza	0.02581	0.008501	0.3294	0.025
	Centro	10.15	0.005759	0.0005676	10.15
	Larghezza	0.01435	0.003227	0.2248	0.02
G2	Ampiezza	0.01526	0.002817	0.1847	0.02
	Centro	11.03	0.01589	0.001441	11
	Larghezza	0.1069	0.021	0.1965	0.15
Numeri di Punti del Fit					
Punti		33			
Statistiche dei residui					
Media residui		4.52×10^{-12}			
Media residui/Media Dati		3.587×10^{-10}			
RMS residui		0.00344			
R.M.S. residui/Media Dati		0.273			
Coefficiente di determinazione					
R^2		0.7111			

Tabella 5.7: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione hot outbound di Umbriel, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

L'analisi del fitting numerico applicato alla popolazione elettronica calda nella regione outbound di Umbriel evidenzia una fenomenologia articolata, che non sembra riconducibile a un semplice processo di assorbimento geometrico da parte del satellite. Il profilo di densità mostra infatti una componente di fondo continua e non trascurabile ($C \approx 0.0087$), sulla quale si innestano due incrementi localizzati (G1 a $10.15 R_U$ e G2 a $11.03 R_U$), confermando la presenza di strutture fisicamente significative. Questa configurazione osservativa, coerente con i modelli di dinamica magnetosferica sviluppati a partire dai dati di Voyager 2, suggerisce una prevalente influenza dei meccanismi di trasporto magnetosferico rispetto a processi di interazione diretta con Umbriel [56]. L'assenza di una cavità di densità marcata – in contrasto con la firma attesa per una scia geometrica stabile – risulta compatibile con la fisica del trasporto degli elettroni energetici nella magnetosfera uraniana. Studi precedenti indicano che gli elettroni a bassa energia tendono a co-rotare con il campo magnetico, mentre quelli più energetici sono dominati da moti di deriva azimutali altamente efficienti [60, 74]. Tale efficienza è sufficiente a colmare rapidamente deplezioni localizzate generate dal passaggio di corpi ostacolanti, giustificando la persistenza del livello di fondo (C). Un ulteriore contributo può derivare da processi di trasporto impulsivo: la magnetosfera interna di Urano è infatti soggetta a iniezioni intermittenti di plasma, con trasferimento verso le regioni interne di materiale energetico [75]. In questo quadro, le strutture G1 e G2 potrebbero rappresentare variazioni transitorie legate a fenomeni globali e non direttamente prodotti dall'interazione Umbriel-plasma. Un'interpretazione alternativa, sebbene non mutuamente esclusiva, considera la possibilità di contributi da meccanismi di wake. Simulazioni e osservazioni in altri sistemi planetari (come ad esempio quello di Saturno) mostrano che durante il riempimento della scia possono instaurarsi instabilità elettrostatiche e onde capaci di trasferire energia alla popolazione elettronica, producendo incrementi locali nella componente “hot” [69]. In tale prospettiva, la struttura G2 – posizionata leggermente a valle dell'orbita lunare – potrebbe riflettere un episodio localizzato di energizzazione. Tuttavia, data la natura puntuale del dato e l'assenza di una risoluzione spaziale adeguata, tale ipotesi richiede cautela.

In sintesi, i risultati non sembrano escludere il ruolo di Umbriel come corpo assorbitore, ma indicano che nella banda energetica considerata l'impronta geometrica dell'interazione viene sostanzialmente sopraffatta dalla dinamica magnetosferica globale. L'elevata efficienza dei moti di deriva [74], combinata con la presenza di iniezioni impulsive di plasma [75], rallenta la formazione di un'evidente impronta di assorbimento. Ciò si traduce in un profilo osservato dominato non da una cavità di densità, ma da fluttuazioni e incrementi localizzati, che riflettono la natura transiente e dinamica dell'ambiente magnetosferico uraniano.

5.4.2 Popolazione Fredda

Miranda

Il profilo di densità della popolazione elettronica fredda nella fase di outbound mostra una configurazione particolarmente articolata, che sembra riflettere una dinamica potenzialmente più complessa rispetto alle altre regioni analizzate. L'ispezione visiva dei dati (Figura 5.21) rivela una serie di picchi e strutture distribuite su un'ampia regione radiale, da circa 4.25 a $5.8 R_U$.

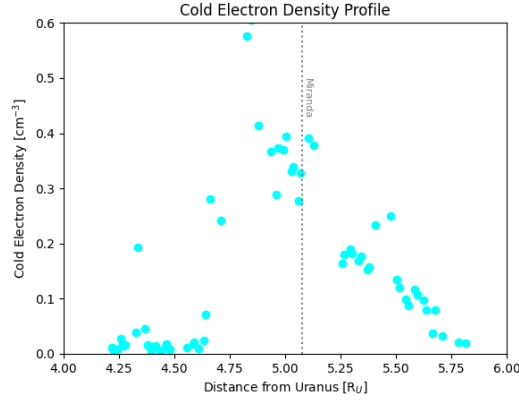


Figura 5.21: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica fredda intorno a Miranda. Dati relativi alla traiettoria di Outbound

Al fine di descrivere quantitativamente la complessità osservata nel profilo, è stato adottato un approccio di fitting suddiviso in più fasi, che ha portato all'utilizzo di un modello composito basato su quattro componenti gaussiane visibile in Figura 5.22. Il modello ottenuto risulta coerente con i dati sperimentali, con un coefficiente di determinazione $R^2 = 0.96$, indicando che la formulazione adottata cattura gran parte della variabilità osservata. L'analisi dei residui (pannello inferiore della Figura 5.22) mostra scostamenti contenuti e privi di schemi ricorrenti, a supporto della consistenza interna del fitting, pur senza implicare un'interpretazione univoca delle strutture identificate. L'analisi dei residui (pannello inferiore della Figura 5.22) conferma la bontà del modello, mostrando scostamenti minimi e privi di pattern evidenti. La decomposizione del profilo evidenzia quattro contributi funzionali statisticamente significativi, tra cui:

- **Componente 1 (G1):** situata a una distanza radiale inferiore rispetto alle altre ($\approx 4.346 R_U$), è caratterizzata da una larghezza molto contenuta ($\approx 0.01 R_U$) e un'ampiezza pari a $0.29 \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$. I parametri sono determinati con S/N elevato (> 5.9), suggerendo una struttura ben definita, sebbene la sua natura fisica resti separata dal complesso associato all'interazione con Miranda.
- **Componente 2 (G2):** rappresenta il contributo dominante, con ampiezza $0.60 \pm 0.05 \text{ cm}^{-3}$ e centro a $4.80 \pm 0.01 R_U$. La sua collocazione a monte dell'orbita potrebbe indicare una regione di accumulo del plasma freddo prima dell'interazione con la luna.
- **Componente 3 (G3):** centrata a $5.07 \pm 0.02 R_U$, si posiziona in una regione intermedia tra la struttura dominante G1 e la componente più esterna G3. Presenta un'ampiezza di $\approx 0.35 \pm 0.03 \text{ cm}^{-3}$ e una larghezza caratteristica di circa $0.12 R_U$. I parametri statistici del fit ($S/N > 3$) suggeriscono che possa rappresentare una fluttuazione di densità fisicamente distinta, pur non escludendo che parte del segnale risenta della vicinanza delle strutture adiacenti o di effetti legati alla risoluzione del modello.

- **Componente 4 (G4):** modellata come una spalla più ampia e meno intensa, centrata a $5.44 \pm 0.06 R_U$, descrive il graduale riassetamento del plasma verso condizioni di fondo. I parametri risultano statisticamente ben definiti ($S/N > 3$).

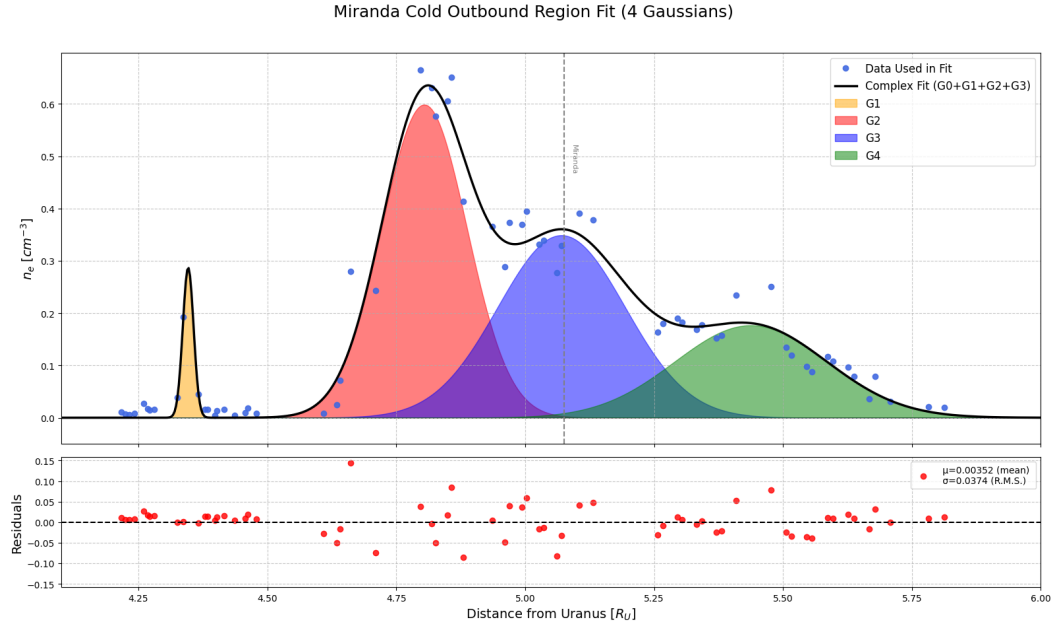


Figura 5.22: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
G1	Ampiezza	0.287	0.04862	0.1694	0.2
	Centro	4.346	0.001164	0.0002679	4.35
	Larghezza	0.01045	0.0009137	0.08743	0.05
G2	Ampiezza	0.5987	0.05271	0.08804	0.7
	Centro	4.804	0.01196	0.00249	4.8
	Larghezza	0.08282	0.008121	0.09805	0.05
G3	Ampiezza	0.3489	0.03	0.08598	0.4
	Centro	5.07	0.02562	0.005054	5.1
	Larghezza	0.1236	0.04151	0.3359	0.08
G4	Ampiezza	0.1767	0.02704	0.153	0.25
	Centro	5.437	0.06167	0.01134	5.4
	Larghezza	0.1477	0.04929	0.3337	0.15
Numeri di Punti del Fit					
Punti		65			
Statistiche dei residui					
Media residui		0.00352			
Media residui/Media Dati		0.0201			
RMS residui		0.0374			
R.M.S. residui/Media Dati		0.214			
Coefficiente di determinazione					
R ²		0.9574			

Tabella 5.8: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione cold outbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

L'analisi congiunta delle quattro componenti rivela un quadro fisicamente articolato. La struttura stretta G1, localizzata a circa $4.35 R_U$ e chiaramente separata dal sistema principale associato a Miranda, non mostra un'evidenza diretta di correlazione con l'interazione locale. La sua origine rimane pertanto oggetto di interpretazione: potrebbe riflettere un fenomeno transitorio o legato a dinamiche lungo la traiettoria di Voyager 2 non pienamente risolte dai dati. Non si esclude, in via ipotetica, un contributo indiretto da parte di processi connessi alle lune interne — in particolare Ariel ($\sim 7.6 R_U$) — la cui influenza risulterebbe coerente con l'esistenza di una sorgente di plasma estesa individuata tra Miranda e Ariel [76]. Tale eventualità, sebbene non sia verificabile con le informazioni attualmente disponibili può pertanto essere considerata solo a livello qualitativo, senza che essa assuma un ruolo predominante nell'interpretazione del quadro emerso.

Le componenti G2, G3 e G4 mostrano invece una plausibile connessione con l'interazione con Miranda. G2 appare compatibile con una compressione del plasma nella regione a monte, mentre G3 — localizzata in prossimità della posizione orbitale della luna — potrebbe rappresentare un potenziamento del centro della scia (central wake enhancement), come osservato in wake di lune ghiacciate e plasmi freddi [69, 77]. In determinati regimi, in particolare in plasmi freddi e debolmente collisionali, la deviazione laterale del flusso può favorire una riconvergenza a valle lungo l'asse principale, dando luogo a un aumento locale di densità. La collocazione radiale di G3 risulta coerente con questo tipo di meccanismo, pur richiedendo ulteriori verifiche per confermarne l'origine [78, 79]. La componente G4 descrive la regione più esterna della scia, dove il disturbo tende ad attenuarsi e il plasma sembra progressivamente riallinearsi alle condizioni ambientali, come evidenziato da simulazioni ibride di wake satellitari [69, 77]. Tale comportamento potrebbe riflettere la fase di dissipazione della perturbazione a valle dell'interazione.

In sintesi, i risultati dell'analisi suggeriscono che, nella fase outbound, l'interazione con Miranda non si manifesti esclusivamente tramite una deplezione di densità, ma attraverso una sequenza più complessa di processi: compressione a monte, riaccumulazione centrale e graduale rilassamento a valle. Questo quadro risulta coerente con scenari di scia plasmatica evoluta, supportati da studi teorici e simulazioni ibride su wake di corpi ghiacciati [69, 77, 78], pur rimanendo soggetto a margini di incertezza legati alla natura locale dei dati e ai limiti della risoluzione.

Per completare l'analisi della popolazione elettronica fredda in prossimità di Miranda, è stato realizzato un fit alternativo (Figura 5.23) in cui la componente stretta e localizzata inizialmente identificata come G1 è stata sostituita da un contributo costante, indicato come C . Questo modello “3 Gaussiane + 1 Costante” permette di valutare l'impatto della struttura stretta sulle caratteristiche globali della scia e sulla qualità complessiva del fit. Il coefficiente di determinazione globale ottenuto, $R^2 = 0.944$, suggerisce che, pur risultando leggermente inferiore rispetto al modello originale (4 Gaussiane), la sostituzione di G1 con un floor costante mantiene una capacità descrittiva complessivamente soddisfacente. Ciò indica che la struttura stretta contribuisce in maniera significativa alla variabilità locale, ma non è indispensabile per rappresentare l'andamento generale della densità. La componente costante C0, collocata nella regione più interna (tra circa 4.2 e $4.5 R_U$), assume un valore di $0.024 \pm 0.009 \text{ cm}^{-3}$ con $S/N = 2.66$, suggerendo che il contributo medio del

plasma in questa zona è ridotto, ma comunque rilevabile. Le tre gaussiane rimanenti, identificate come G1-G2-G3 nel nuovo schema (equivalenti a G2-G3-G4 del modello originale), conservano caratteristiche simili in termini di ampiezza, posizione radiale e larghezza, indicando che la struttura principale associata alla scia di Miranda risulta robusta. In particolare, G1 continua a rappresentare il picco dominante a monte dell'orbita della luna, G2 descrive la regione centrale della scia, mentre G3 caratterizza la transizione verso le condizioni ambientali di fondo a valle. L'analisi dei residui mostra scostamenti contenuti e privi di pattern sistematici, coerenti con l'adozione del floor costante. Ciò suggerisce che la dinamica complessiva del plasma nella zona studiata può essere descritta senza la necessità di una struttura estremamente localizzata. Questo approccio offre pertanto una parametrizzazione più semplice, utile per confronti con modelli teorici o simulazioni, pur continuando a rappresentare i principali fenomeni fisici legati all'interazione con Miranda, pur mantenendo un adeguato livello di cautela interpretativa.

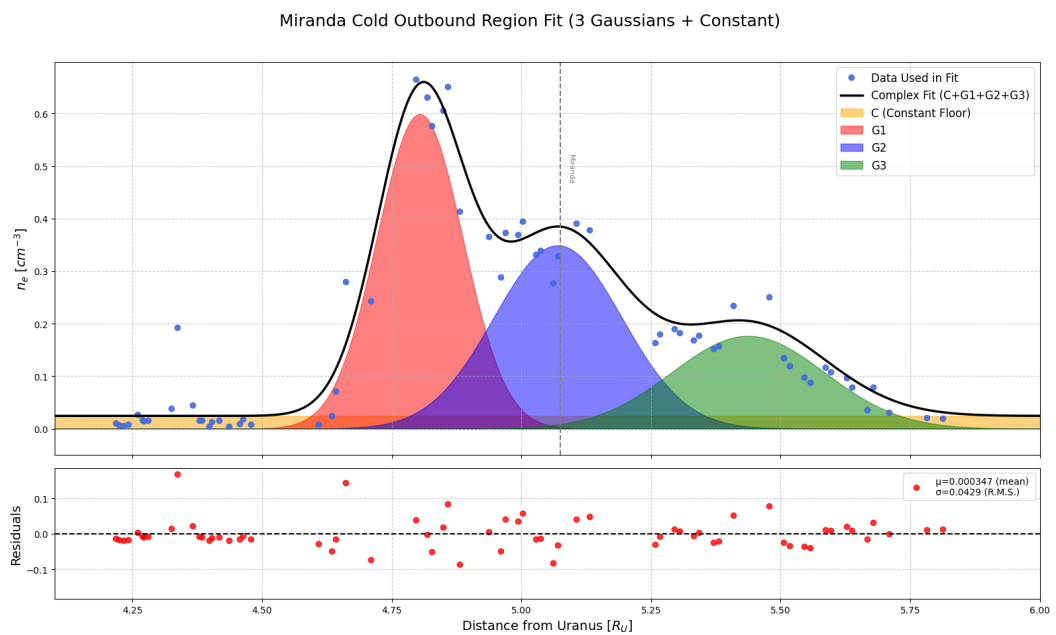


Figura 5.23: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell’accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ /Valore	Valore a priori
C (Constant Floor)	Costante	0.02436	0.009153	0.3758	0.01478
G1	Ampiezza	0.5987	0.05271	0.08804	0
	Centro	4.804	0.01196	0.00249	0
	Larghezza	0.08282	0.008121	0.09805	0
G2	Ampiezza	0.3489	0.03	0.08598	0
	Centro	5.07	0.02562	0.005054	0
	Larghezza	0.1236	0.04151	0.3359	0
G3	Ampiezza	0.1767	0.02704	0.153	0
	Centro	5.437	0.06167	0.01134	0
	Larghezza	0.1477	0.04929	0.3337	0
Numeri di Punti del Fit					
Punti		65			
Statistiche dei residui					
Media residui		0.00347			
Media residui/Media Dati		0.0198			
RMS residui		0.0429			
R.M.S. residui/Media Dati		0.245			
Coefficiente di determinazione					
R ²		0.9440			

Tabella 5.9: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione cold outbound di Miranda, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

Umbriel

L'analisi del profilo di densità della popolazione elettronica fredda nell'intervallo radiale compreso tra 9.0 e 12.0 R_U (Figura 5.24) mostra una morfologia articolata che, in analogia con la componente calda, sembra discostarsi dal modello canonico di scia di assorbimento.

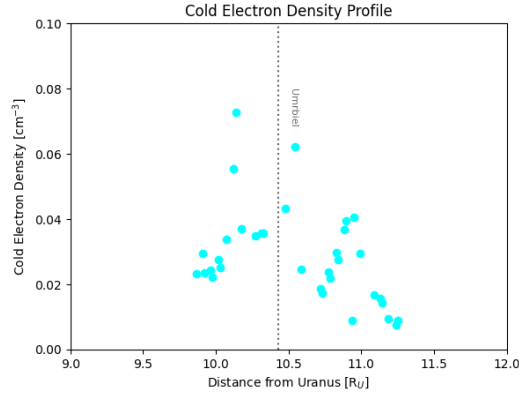


Figura 5.24: Rappresentazione del profilo di densità della popolazione elettronica fredda intorno a Umbriel. Dati relativi alla traiettoria di Outbound

Per isolare le possibili strutture fisiche dal contributo di fondo è stata adottata una strategia in due fasi, basata sulla sottrazione del continuo e successivamente su un fitting multi-gaussiano. Il modello globale (visibile in Figura 5.25) fornisce un livello di aderenza ai dati complessivamente soddisfacente ($R^2 = 0.7169$). Il grafico di fitting risulta composto da quattro contributi distinti, tutti con parametri statisticamente significativi:

- **Componente Costante:** Il livello di fondo ($C = 0.0083 \pm 0.0007 \text{ cm}^{-3}$, $S/N = 11.8$) mostra valori comparabili a quelli ottenuti per la popolazione calda ($C_{hot} \approx 0.0087$), indicando che le due componenti potrebbero condividere lo stesso ambiente plasmatico di base, sebbene con dinamiche energetiche differenti.
- **Componente 1 (G1):** Una prima struttura, centrata a circa $10.17 R_U$, appare ampia ed estesa ($\approx 0.155 R_U$) e risulta co-localizzata con il picco osservato per la componente calda. Questa coincidenza spaziale sembra suggerire la possibile presenza di una perturbazione su scala più ampia rispetto alla semplice interazione geometrica luna-plasma; tuttavia, non si può escludere completamente che effetti locali o temporanei contribuiscano a modellarne la forma.
- **Componente 2 (G2):** In prossimità dell'orbita lunare, a circa $10.52 R_U$, emerge una struttura particolarmente intensa e localizzata (ampiezza ≈ 0.0625 , larghezza $\approx 0.036 R_U$). In questo caso, il confronto con la componente calda mostra una divergenza significativa: mentre il profilo freddo presenta qui un picco stretto e impulsivo, la componente calda evidenziava un incremento più diffuso e collocato a distanze maggiori ($11.03 R_U$). Questo comportamento

potrebbe riflettere la diversa risposta dinamica delle popolazioni termica e energetica.

- **Componente 3 (G3):** Una terza componente, localizzata più esternamente ($R \approx 10.90$) R_U e caratterizzata da una larghezza maggiore (≈ 0.133) R_U . A differenza del caso hot, tale struttura non trova un corrispettivo diretto nel fit precedente, suggerendo un possibile effetto specifico della componente fredda nelle regioni più esterne.

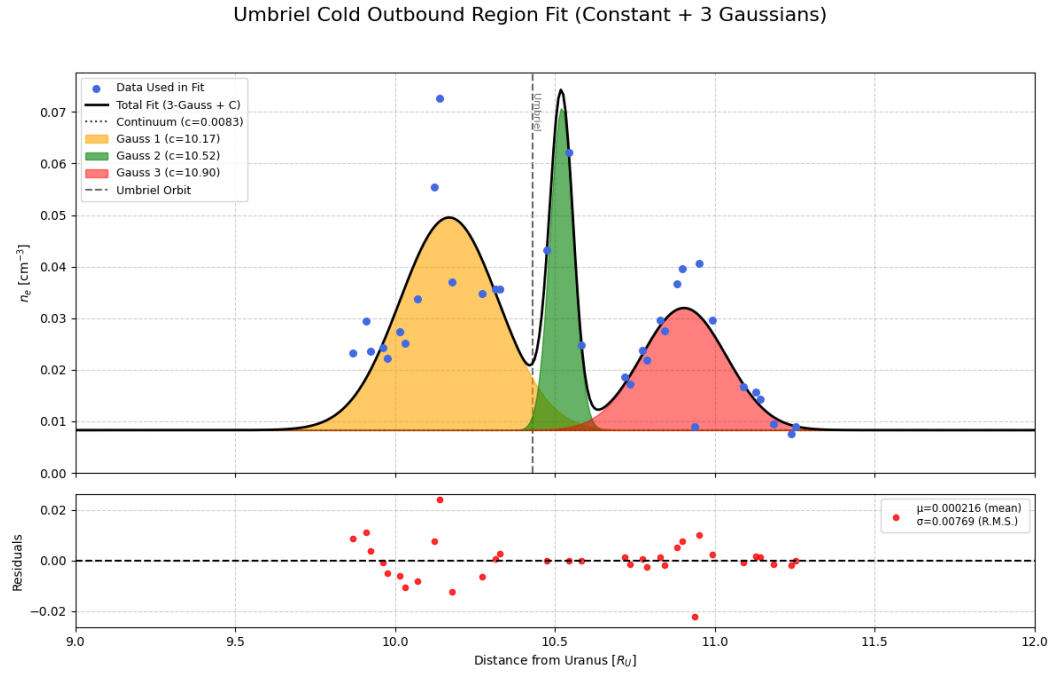


Figura 5.25: Rappresentazione grafica del fit applicato ai dati, con modello totale, componenti individuali e analisi dei residui per la valutazione dell'accuratezza.

Componente	Parametro	Valore	σ	σ/Valore	Valore a priori
Plateau	Costante	0.0083	0.0007	0.0843	
G1	Ampiezza	0.04124	0.004673	0.1133	0.05
	Centro	10.17	0.02087	0.002052	10.15
	Larghezza	0.1547	0.02381	0.1539	0.1
G2	Ampiezza	0.06251	0.01587	0.2539	0.04
	Centro	10.52	0.006798	0.0006461	10.5
	Larghezza	0.03654	0.0083	0.2271	0.1
G3	Ampiezza	0.02369	0.003964	0.1673	0.02
	Centro	10.9	0.03024	0.002774	10.9
	Larghezza	0.1326	0.03107	0.2343	0.2
Numeri di Punti del Fit					
Punti		34			
Statistiche dei residui					
Media residui		0.000216			
Media residui/Media Dati		0.00752			
RMS residui		0.00769			
R.M.S. residui/Media Dati		0.268			
Coefficiente di determinazione					
R^2		0.7169			

Tabella 5.10: Parametri del fit applicato al profilo di densità elettronica nella regione cold outbound di Umbriel, con incertezze, valori a priori e metriche di qualità del modello (media, RMS dei residui e coefficiente di determinazione R^2).

L'analisi morfologica del profilo di densità fredda ottenuto in prossimità di Umbriel, coerentemente a quanto osservato nel caso della popolazione calda, evidenzia alcune caratteristiche che si discostano dal comportamento tipico associato a un'interazione di tipo "luna inerte-plasma", come descritto dalla letteratura derivante dai dati Voyager 2, dove le lune uraniane vengono generalmente interpretate come assorbitori passivi in grado di generare depressioni di densità stabili [56, 80]. Nel caso in questione, il fitting mostra invece la presenza di strutture di incremento di densità (G1, G2, G3), la cui interpretazione può essere orientativamente ricondotta a due processi fisici distinti.

In primo luogo, la componente impulsiva G2, localizzata immediatamente a valle ($10.52 R_U$) e caratterizzata da un gradiente spaziale marcato, potrebbe essere associata ai fenomeni di riempimento dinamico della scia (wake refilling). Nei regimi supersonici o super-alfvenici, il plasma in ingresso non ristabilisce istantaneamente le condizioni di equilibrio a valle dell'ostacolo, e modelli fluidodinamici suggeriscono che, lungo i bordi della scia, si possano sviluppare onde di compressione o fronti convergenti [69, 74]. In tale quadro, il picco osservato potrebbe riflettere una fase transitoria di sovracompressione (overshoot), da considerarsi come possibile ma non univoca traccia del processo di richiusura scia [74]. È interessante che, in corrispondenza della posizione di G2, la popolazione calda mostri a sua volta un incremento diffuso più a valle ($11.03 R_U$), suggerendo un collegamento potenziale tra dissipazione energetica nella scia fredda e riscaldamento della componente elettronica (wake heating) [74]. Si tratta tuttavia di un'interpretazione che richiede ulteriori verifiche, sia per la limitata risoluzione spaziale del dataset sia per l'assenza di informazioni temporali.

In secondo luogo, la presenza delle strutture G1 e G3 può essere coerente con scenari di variabilità globale del plasma magnetosferico, in linea con appositi modelli descrittivi [75, 80], relativi a eventi di iniezione stocastica di particelle. L'assenza di un'atmosfera significativa su Umbriel rende meno probabile un accumulo locale di materiale a monte, motivo per cui l'incremento a G1 potrebbe riflettere una perturbazione magnetosferica non direttamente legata alla geometria del flyby. La quasi co-localizzazione spaziale delle strutture G1 nelle popolazioni fredda e calda (rispettivamente a $10.17 R_U$ e $10.15 R_U$) è coerente con l'ipotesi che Voyager 2 abbia intercettato una nube di plasma eterogenea durante il sorvolo, in linea con l'interazione con eventi transitori di tipo injection [75]. Pur non costituendo una prova definitiva, tale coincidenza suggerisce che fenomeni globali di variabilità possano mascherare la firma di assorbimento geometrico prevista dai modelli classici [80].

In sintesi, i dati indicano che nella regione di outbound l'interazione non è dominata esclusivamente dall'assorbimento da parte del corpo, ma risulta verosimilmente influenzata da processi dinamici (wake refilling e potenziale trasferimento energetico alla componente calda) [69, 74] e dalla variabilità della magnetosfera uraniana [75, 80]. L'osservata coerenza tra i marker di densità nelle due popolazioni energetiche appare compatibile con gli scenari ipotizzati, pur restando condizionata da limiti di risoluzione e dalla natura puntuale dell'osservazione. Ulteriori analisi, idealmente basate su misure ad alta risoluzione o su modelli numerici dedicati, sarebbero necessarie per validare in modo più conclusivo i meccanismi proposti.

5.5 Risultati dell'Elaborazione e Confronto con la Letteratura

L'analisi numerica dei dati PLS ha permesso di riconsiderare l'interazione tra i satelliti interni di Urano e il plasma magnetosferico, evidenziando alcune dinamiche non pienamente caratterizzate dagli studi originari della missione Voyager 2 [43, 56]. Pur confermando l'impostazione generale secondo cui le lune agiscono prevalentemente come assorbitori passivi in un ambiente a bassa densità, l'applicazione del fitting multi-componente ha evidenziato la presenza di fenomeni aggiuntivi che suggeriscono un comportamento fisicamente più articolato. Per Miranda, le strutture identificate a monte e a valle dell'interazione appaiono compatibili con una perturbazione locale del flusso, riconducibile a processi fluidodinamici analoghi a quelli descritti per lune ghiacciate di altri sistemi planetari [69, 77]. Le evidenze sperimentali indicano che la scia non si limiti a una semplice cavità per assorbimento, ma presenti elementi associabili a fenomeni di pre-compressione e riaccumulazione centrale. Tali risultati sono coerenti con scenari interpretativi avanzati, pur non suggerendo un ruolo determinante del satellite nel confinamento del plasma interno, in accordo con le analisi comparative precedenti [60]. Nel caso di Umbriel, l'assenza di una scia stabile e l'individuazione di incrementi di densità a carattere episodico e condivisi tra diverse popolazioni energetiche risultano coerenti con un'interazione dominata dai processi magnetosferici globali [74, 75]. L'interpretazione suggerisce che, in condizioni di trasporto rapido o di iniezione impulsiva, l'impronta lasciata dal satellite possa venire rapidamente attenuata, rendendo la firma osservabile solo in modo parziale. Ciò non implica un'assenza di interazione, ma riflette un regime in cui i tempi scala del riempimento magnetosferico risultano comparabili o inferiori a quelli associati alla formazione della scia. Considerando inoltre i recenti studi dedicati al contesto operativo del flyby, è opportuno osservare che l'incontro tra Voyager 2 e il sistema uraniano potrebbe essersi verificato durante una fase di marcata compressione magnetosferica indotta dal vento solare [45]. Questo elemento contribuisce a giustificare parte delle perturbazioni rilevate, indicando che alcune delle strutture osservate potrebbero riflettere una risposta globale del sistema piuttosto che un'interazione pienamente stazionaria. In sintesi, pur nei limiti imposti dalla risoluzione spaziale e dall'approccio parametrico adottato, i risultati ottenuti non modificano sostanzialmente il modello di assorbimento dedotto dai dati originali [56], ma ne arricchiscono l'interpretazione. L'evidenza sperimentale indica che Miranda genera una perturbazione locale strutturata senza tuttavia esercitare un effetto significativo sul plasma interno su scala globale; Umbriel, invece, mostra una risposta più attenuata, compatibile con un ambiente dominato da processi transitori magnetosferici. Questi elementi si integrano con i modelli esistenti, offrendo una lettura più articolata della natura dell'interazione luna-plasma nel sistema uraniano.

Capitolo 6

Conclusione

6.1 Sintesi dei Risultati Principali

L'analisi condotta sui dati del Plasma Science Experiment di Voyager 2 ha permesso di riesaminare in chiave moderna uno dei dataset più preziosi disponibili sul sistema uraniano. Attraverso una pipeline di elaborazione costruita interamente in ambiente Python, è stato possibile estrarre, filtrare e analizzare in modo sistematico le principali proprietà fisiche del plasma rilevato durante il sorvolo del pianeta nel gennaio 1986. L'integrazione con i kernel SPICE ha fornito un collegamento tra le grandezze osservate (densità, velocità e temperatura) e le corrispondenti condizioni orbitali, consentendo una ricostruzione coerente – nei limiti imposti dalla risoluzione spaziotemporale e dall'unicità del flyby – della distribuzione del plasma lungo la traiettoria della sonda. Questo approccio numerico ha reso possibile una reinterpretazione quantitativa delle firme di interazione con i satelliti interni, offrendo una base più strutturata per il confronto con modelli teorici e studi precedenti, pur mantenendo le necessarie cautele legate alla natura limitata e puntuale del dataset. I risultati del fitting hanno evidenziato due modalità di interazione con caratteristiche distintive e strettamente dipendenti dal contesto locale. Nel caso di Miranda, i dati suggeriscono che il satellite non agisca semplicemente come un corpo inerte che genera una cavità geometrica, ma piuttosto come un ostacolo in grado di modulare localmente il flusso di plasma. La scia osservata a valle mostra un incremento centrale della densità, accompagnato da segnali di compressione a monte, coerenti con fenomeni di riconvergenza e potenziale focalizzazione ionica, tipici di wake evoluti. Sebbene la natura transitoria di alcune strutture richieda cautela nell'interpretazione, il quadro complessivo supporta l'idea di un'interazione più articolata rispetto a un semplice effetto di deplezione. Per Umbriel, invece, i risultati indicano che l'interazione con il plasma è fortemente influenzata dalle condizioni globali della magnetosfera, caratterizzata da una popolazione più calda e rarefatta. L'assenza di una scia marcata e la presenza di incrementi locali di densità sia nella componente fredda sia in quella calda suggeriscono che processi di trasporto rapido e iniezioni stocastiche predominino sulle dinamiche di assorbimento diretto, limitando la persistenza di una firma geometrica stabile. In questo contesto, Umbriel agisce più come un modulatore passivo del flusso, con effetti locali subordinati alla dinamica complessiva del plasma. Nel complesso, lo studio conferma la complessità della magnetosfera uraniana, evidenziando come i satelliti interni

possano esercitare un'influenza locale significativa senza necessariamente generare strutture di deplezione sistematiche. La coerenza dei risultati con studi teorici e osservazioni di altri sistemi planetari suggerisce che fenomeni quali compressione a monte, riaccumulazione centrale e refilling della scia siano processi universali in contesti di plasma freddo e debolmente collisionali. Infine, dal punto di vista metodologico, l'integrazione di librerie moderne come `Speasy` e `SciPy` ha consentito la realizzazione di un flusso di lavoro completamente riproducibile e flessibile. Questo approccio valorizza i dati storici della missione Voyager 2 e apre la possibilità di estendere analisi analoghe a futuri dataset di missioni dedicate al sistema di Urano o ad altre magnetosfere planetarie.

6.2 Limiti ed Incertezze del Lavoro

Pur fornendo indicazioni interessanti sull'ambiente magnetosferico di Urano, il presente studio è soggetto a diverse limitazioni intrinseche, sia di natura strumentale sia metodologica, che è opportuno discutere per una corretta interpretazione dei dati:

- **Copertura temporale ridotta:** le misurazioni del Plasma Science Experiment di Voyager 2 si riferiscono a un intervallo ristretto, circoscritto al periodo del flyby di Urano nel gennaio 1986. Tale finestra osservativa non consente di distinguere in maniera definitiva tra variazioni locali effettive del plasma e fluttuazioni temporanee dovute a condizioni transitorie o all'orientamento specifico del campo magnetico durante il sorvolo.
- **Risoluzione e incertezze strumentali:** i parametri derivati dai dati di fitting del PLS si basano su modelli di distribuzione energetica che separano componenti ioniche ed elettroniche; tali elaborazioni introducono incertezze legate alle assunzioni del modello e alla risposta energetica limitata dello strumento. Inizialmente si è tentato di attribuire ai punti di misura pesi proporzionali alla loro affidabilità (errore relativo del 10% sulla densità, [39]), ma i picchi locali fisicamente rilevanti risultavano penalizzati. Si è pertanto adottato un fitting senza pesi, garantendo una rappresentazione più fedele delle strutture locali, pur riconoscendo la limitazione nella gestione formale dell'errore.
- **Procedure di filtraggio e pulizia dei dati:** la rimozione di outlier e valori mancanti, necessaria per stabilizzare i fit, potrebbe aver escluso informazioni fisicamente rilevanti, soprattutto in regioni con rapidi gradienti spaziali o temporali.
- **Ambito limitato dell'analisi:** lo studio si concentra sulla densità del plasma, senza considerare la componente vettoriale della velocità, le variazioni del campo magnetico o la temperatura, che avrebbero potuto fornire ulteriori vincoli interpretativi. Una valutazione più completa richiederebbe l'integrazione dei dati PLS con quelli di altri strumenti di Voyager 2 (Magnetometer, Low-Energy Charged Particle Experiment), operazione che esula dagli obiettivi di questo lavoro.

Nonostante queste limitazioni, i risultati ottenuti offrono indicazioni qualitative significative, suggerendo possibili interazioni tra il plasma uraniano e le lune interne. Essi costituiscono quindi un punto di partenza per analisi future, che potranno beneficiare di strumenti di modellazione numerica e di confronti interplanetari per verificare la robustezza delle tendenze qui osservate.

6.3 Prospettive Future e Conclusioni Finali

Il riesame dei dati del Plasma Science Experiment di Voyager 2 ha permesso di valorizzare un archivio di straordinario interesse storico e scientifico, offrendo una prospettiva aggiornata sull'ambiente magnetosferico di Urano e sulle interazioni tra plasma e satelliti interni. I risultati ottenuti indicano che le modalità di interazione di Miranda e Umbriel differiscono significativamente: Miranda appare in grado di generare strutture di scia articolate, con regioni di compressione a monte e possibili incrementi lungo l'asse centrale, mentre Umbriel interagisce in un contesto dominato dalla dinamica globale della magnetosfera, senza produrre una scia di deplezione stabile. Queste evidenze contribuiscono a una comprensione più sfumata dei ruoli dei satelliti, integrando e aggiornando le osservazioni storiche di Voyager 2. Dal punto di vista metodologico, lo studio ha dimostrato l'utilità di un approccio basato su strumenti di calcolo moderno e accesso automatizzato ai database scientifici. L'impiego combinato delle librerie *Speasy* e *SciPy* ha permesso di sviluppare una pipeline di analisi riproducibile e flessibile, capace di trattare dati storici con metodi contemporanei, mantenendo la coerenza e la robustezza dei risultati. Questo approccio metodologico costituisce un esempio operativo trasferibile ad altri contesti planetologici, valorizzando il patrimonio delle missioni passate. I risultati ottenuti hanno anche implicazioni più ampie nello studio dei giganti di ghiaccio. Urano, così come Nettuno, rappresenta una classe planetaria ancora largamente inesplorata, di particolare interesse per la comprensione dei processi di formazione ed evoluzione dei sistemi planetari, inclusi quelli extrasolari [47, 81]. Le strutture complesse evidenziate, come la scia articolata di Miranda o i fenomeni di compressione locale presso Umbriel, indicano che la strumentazione di nuova generazione potrà chiarire meglio i processi fisici alla base di tali interazioni. Missioni come l'*Uranus Orbiter and Probe* (UOP) [82], attualmente indicata come priorità massima dal *Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey* [83], risultano fondamentali per discriminare tra fenomeni endogeni dei satelliti e risposte della magnetosfera a driver esterni, fornendo un quadro più completo della dinamica del plasma e della struttura di un gigante di ghiaccio. In sintesi, questo lavoro non si limita a reinterpretare dati storici, ma propone un contributo metodologico e concettuale che può fungere da ponte verso la ricerca futura. L'analisi evidenzia la complessità dell'ambiente magnetosferico di Urano e il ruolo non trascurabile dei satelliti interni nelle sue dinamiche locali. L'eredità di Voyager 2 resta un riferimento prezioso, dimostrando che anche un singolo sorvolo, se analizzato con strumenti e approcci moderni, può generare conoscenza significativa e orientare lo sviluppo delle missioni dei prossimi decenni.

Bibliografia

- [1] W. Herschel. «Account of a Comet [Discovery of Uranus] (1781)». In: *The Scientific Papers of Sir William Herschel: Including Early Papers Hitherto Unpublished*. A cura di John Louis Emil Editor Dreyer. Cambridge Library Collection - Astronomy. Cambridge University Press, 2013, pp. 30–38.
- [2] F. W. Price. «Uranus». In: *The Planet Observer's Handbook*. Cambridge University Press, 2000, pp. 323–345.
- [3] W. Blitzstein. «The seven identified observations of Uranus made by John Flamsteed using his mural arc». In: *The Observatory*, vol. 118, p. 219–222 (1998) 118 (1998), pp. 219–222.
- [4] S. Schaffer. «Uranus and the Establishment of Herschel's Astronomy». In: *Journal for the History of Astronomy* 12 (gen. 1981), p. 11. DOI: 10.1177/002182868101200102.
- [5] W. Herschel. *The Scientific Papers of Sir William Herschel: Including Early Papers Hitherto Unpublished*. A cura di John Louis Emil Dreyer. Vol. 1. Collected and edited under the direction of a joint committee of the Royal Society and the Royal Astronomical Society. London: The Royal Society e The Royal Astronomical Society, 1912.
- [6] A. Armitage. *William Herschel*. London: Thomas Nelson e Sons, Ltd., 1962.
- [7] J. E. Bode. *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1784 (1781)*. Digital edition: Bavarian State Library, München; Call no. Eph.astr. 23-1784. URL: <https://www.digitale-sammlungen.de/de/details/bsb10538313>. Berlin: Dümmler, 1781.
- [8] W. G. Colgrove. «The Planet Uranus». In: *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada* 21 (dic. 1927), p. 349.
- [9] Great Britain. Admiralty e Great Britain. Nautical Almanac Office. *The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the Year 1850*. London: Published by order of the Lords Commissioners of the Admiralty, 1850. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037941526>.
- [10] J. F. W. Herschel. «On the Satellites of Uranus». In: *Memoirs of the Royal Astronomical Society* 8 (gen. 1835), p. 1.
- [11] NASA Jet Propulsion Laboratory. *Planetary Satellite Mean Elements*. <https://ssd.jpl.nasa.gov/sats/ele>. Solar System Dynamics Group. (Visitato il giorno 27/10/2025).

- [12] W. Herschel. «On the Discovery of Four Additional Satellites of the Georgium Sidus. The Retrograde Motion of Its Old Satellites Announced; And the Cause of Their Disappearance at Certain Distances from the Planet Explained». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 88.Part I (1798), pp. 47–79. ISSN: 0261-0523. URL: <https://doi.org/10.1098/rstl.1798.0005>.
- [13] W. Herschel. «XXII. On the georgian planet and its satellites». In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 78 (1788), pp. 364–378. DOI: [doi: 10.1098/rstl.1788.0024](https://doi.org/10.1098/rstl.1788.0024). URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstl.1788.0024>.
- [14] W. Lassell. «On the interior satellites of Uranus». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 12 (nov. 1851), p. 15. DOI: [10.1093/mnras/12.1.15](https://doi.org/10.1093/mnras/12.1.15).
- [15] W. C. Bond. «Observations of Lassell’s satellite of Neptune». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 8 (nov. 1847), p. 9. DOI: [10.1093/mnras/8.1.9](https://doi.org/10.1093/mnras/8.1.9).
- [16] W. Lassell. «Letter to the editor [discovery of two satellites of Uranus]». In: *Astronomical Journal* 2 (dic. 1851), pp. 70–70. DOI: [10.1086/100198](https://doi.org/10.1086/100198).
- [17] G. P. Kuiper. «The Fifth Satellite of Uranus». In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 61.360 (giu. 1949), p. 129. DOI: [10.1086/126146](https://doi.org/10.1086/126146).
- [18] J. L. Elliot e P. D. Nicholson. «The rings of Uranus». In: *IAU Colloquium 75: Planetary Rings*. A cura di R. Greenberg e A. Brahic. Gen. 1984, pp. 25–72.
- [19] J. L. Elliot, E. Dunham e D. Mink. «The rings of Uranus». In: *Nature* 267.5609 (mag. 1977), pp. 328–330. DOI: [10.1038/267328a0](https://doi.org/10.1038/267328a0).
- [20] B. A. Smith et al. «Voyager 2 in the Uranian System: Imaging Science Results». In: *Science* 233.4759 (lug. 1986), pp. 43–64. DOI: [10.1126/science.233.4759.43](https://doi.org/10.1126/science.233.4759.43).
- [21] NASA (JPL) / Michele Ostovar (editor). *The History Of JPL*. <https://www.nasa.gov/jpl/jet-propulsion-laboratory-history>. Pagina aggiornata il 22 agosto 2025. Accessed: 2025-11-03. 2025.
- [22] NASA/ Catherine G. Manning (editor). *History of The Deep Space Network*. <https://www.nasa.gov/history/history-of-the-deep-space-network>. Pagina aggiornata il 21 settembre 2023. Accessed: 2025-11-03. 2025.
- [23] J. A. Van Allen et al. «Observation of High Intensity Radiation By Satellites 1958 Alpha and Gamma». In: *Jet Propulsion* Vol: 28 (set. 1958). DOI: [10.2514/8.7396](https://doi.org/10.2514/8.7396). URL: <https://www.osti.gov/biblio/4300875>.
- [24] J. A. Behuncik. *Characteristics of Planetary Fly-by Trajectories: Planetary Fly-by and Associated Free Fall Transfer Trajectories*. NASA Technical Memorandum NASA-TM-X-63029. Accession Number 68N11151; accessed 2025-10-29. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States, 1967. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680001683/downloads/19680001683.pdf>.

- [25] G. A. Flandro. «Fast reconnaissance missions to the outer solar system utilizing energy derived from the gravitational field of Jupiter». In: *Astronautica Acta* 12.4 (1966), pp. 329–337.
- [26] National Research Council. *Planetary Exploration, 1968-1975; Report of a Study by the Space Science Board, Washington, D.C., June 1968*. Washington, DC: The National Academies Press, 1968. DOI: 10.17226/18655. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/18655/planetary-exploration-1968-1975-report-of-a-study-by-the-space-science-board-washington-dc-june-1968>.
- [27] National Research Council. *Outer Solar System: A Program for Exploration, Report of a Study*. Washington, DC: The National Academies Press, 1969. DOI: 10.17226/18530. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/18530/outer-solar-system-a-program-for-exploration-report-of-a>.
- [28] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. *Voyager Spacecraft System: Implementation Plan (originally contained in the response to JPL Request for Proposal 3601)*. Rapp. tecn. NTRS Report 19660011780. Document text includes timeline entries Dec 1969 – Jan 22, 1970; accessed 2025-10-29. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1969. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19660011780/downloads/19660011780.pdf>.
- [29] E. B. Staats. *Status of the Mariner Jupiter/Saturn 1977 Project*. Rapp. tecn. PSAD-77-103. Report to the Congress; accessed: 2025-10-29. United States Government Accountability Office, 1977. URL: <https://www.gao.gov/assets/psad-77-103.pdf>.
- [30] A. G. Stanley, K. E. Martin e W. E. Price. *Voyager Electronic Parts Radiation Program: Volume I – Final Report*. JPL Publication 77-41, Volume I (NASA-CR-155534) JPL-PUB-77-41, Vol. I. Contract No. NAS7-100. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, set. 1977. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19780007219/downloads/19780007219.pdf>.
- [31] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. *“Slice of History – Mariner Jupiter-Saturn 1977 (MJS ’77)”*. <https://www.jpl.nasa.gov/images/slice-of-history-mariner-jupiter-saturn-1977/>. Accessed: 2025-10-29. Set. 2017.
- [32] E. C. Kohlhas e P. A. Penzo. «Voyager Mission Description». In: *Space Science Reviews* 21 (1977). Preprint March 1977; riportato su PDS: https://pds.nasa.gov/data/vg1-j-pls-5-summ-ele-mom-96.0sec-v1.1/vg_1501/document/mission/mission.htm, pp. 77–101.
- [33] NASA / Phil Davis (editor). *The Golden Record — Overview*. <https://science.nasa.gov/mission/voyager/voyager-golden-record-overview>. Pagina aggiornata il 07 aprile 2025. Accessed: 2025-10-30. 2025.
- [34] NASA / Phil Davis (editor). *Voyager — Mission Overview*. <https://science.nasa.gov/mission/voyager/mission-overview>. Pagina aggiornata il 07 aprile 2025. Accessed: 2025-10-30. 2025.

- [35] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. *Instrument Host Information: VG2 (Voyager 2)*. Planetary Data System (PDS). Voyager Neptune/Interstellar Mission: Flight Science Office Science and Mission Systems Handbook, JPL Project Document 618-128; Kohlhasse (1989); Morrison (1982). 2017. URL: https://web.archive.org/web/20170220172046/https://starbrite.jpl.nasa.gov/ds-view/pds/viewHostProfile.jsp?INSTRUMENT_HOST_ID=VG2.
- [36] NASA/JPL-Caltech. *Voyager Diagram*. <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/03/instruments-3.jpg>. Accessed: 2025-10-31. 2025.
- [37] NASA / Phil Davis (editor). *Voyager 1 & 2: Instruments*. <https://science.nasa.gov/mission/voyager/instruments>. Pagina aggiornata il 07 aprile 2025. Accessed: 2025-11-01. 2025.
- [38] NASA/PDS: The Planetary Atmosphere Node. *Voyager Jupiter Data Archive - Understanding the Instruments and Archived Data*. https://atmos.nmsu.edu/data_and_services/atmospheres_data/Voyager/voyager.html. Accessed: 2025-11-14. 2025.
- [39] E. C. Jr. Sittler. *Voyager Plasma Science Instrument Geometry and Modes*. Rapp. tecn. LASP Internal Memorandum. Unpublished internal memorandum, available via LASP Voyager Documentation Archive. Laboratory for Atmospheric e Space Physics, University of Colorado, 1983. URL: <https://lasp.colorado.edu/mop/files/2015/04/SittlerMemo1983.pdf>.
- [40] H. S. Bridge et al. «The Plasma Experiment on the 1977 Voyager Mission». In: *Space Science Reviews* 21.3 (dic. 1977), pp. 259–287. DOI: 10.1007/BF00211542.
- [41] NASA / Phil Davis (editor). *Voyager 1 & 2: Planetary Voyage*. <https://science.nasa.gov/mission/voyager/planetary-voyage>. Pagina aggiornata il 07 aprile 2025. Accessed: 2025-11-03. 2025.
- [42] Voyager Mission Planning Office Staff, Kohlhasse, Charles e Jet Propulsion Laboratory. *The Voyager Uranus Travel Guide*. Rapp. tecn. JPL D-2580. NASA-CR-188441, N91-71286. Pasadena, California: National Aeronautics and Space Administration (NASA), ago. 1985.
- [43] E. C. Stone e E. D. Miner. «The Voyager 2 encounter with the Uranian system». In: *Science* 233.4759 (1986), pp. 39–43.
- [44] NASA / Phil Davis (editor). *Voyager 2*. <https://science.nasa.gov/mission/voyager/voyager-2>. Pagina aggiornata il 02 novembre 2024. Accessed: 2025-11-04. 2025.
- [45] J. M. Jasinski et al. «The anomalous state of Uranus’s magnetosphere during the Voyager 2 flyby». In: *Nature Astronomy* 9 (2025), pp. 66–74. DOI: 10.1038/s41550-024-02389-3. URL: <https://www.nature.com/articles/s41550-024-02389-3>.
- [46] C. S. Arridge et al. «The science case for an orbital mission to Uranus: exploring the origins and evolution of ice giant planets». In: *Planetary and Space Science* 104 (2014), pp. 122–140.

- [47] L. N. Fletcher et al. «Ice Giant Systems: The scientific potential of orbital missions to Uranus and Neptune». In: *Planetary and Space Science* 191 (2020), p. 105030.
- [48] A. Jeandet e A. Schulz. *Speasy*. Ver. 1.6.1. 5 Set. 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17065425. URL: <https://github.com/SciQLop/speasy>.
- [49] A. M. Annex et al. «SpiceyPy: a Pythonic Wrapper for the SPICE Toolkit». In: *Journal of Open Source Software* 5.46 (2020), p. 2050. DOI: 10.21105/joss.02050. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.02050>.
- [50] C. Jacquey et al. «AMDA, Automated Multi-Dataset Analysis: A Web-Based Service Provided by the CDPF». In: *The Cluster Active Archive*. A cura di H. Laakso, B.G. Taylor e M.A. Hapgood. Vol. 11. Astrophysics and Space Science Proceedings. Springer, 2010, pp. 239–247. DOI: 10.1007/978-90-481-3499-1_16.
- [51] C.C. Harvey, C. Huc e M. Nonon-Latapie. «Centre de données de la physique des plasmas». In: *Advances in Space Research* 31.5 (2003). Plasma Processes in the Near-Earth Space: Interball and Beyond, pp. 1291–1295. ISSN: 0273-1177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00943-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00943-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117702009432>.
- [52] Speasy Developers. *Speasy Documentation*. <https://speasy.readthedocs.io/>. Accessed: 2025-11-17. 2025.
- [53] SpiceyPy Developers. *SpiceyPy Documentation*. <https://spiceypy.readthedocs.io/>. Accessed: 2025-11-17. 2025.
- [54] G. Vinci. «Exploring the Plasma Torus of Io: A Journey from History to a New, Multi-Instrument Model of the Source Region in the Jovian Magnetosphere». Tesi di laurea mag. Sapienza - Università di Roma, 2024.
- [55] A. F. Cheng e T. W. Hill. «Do the Satellites of Uranus Control Its Magnetosphere?» In: *JPL Uranus and Neptune*. Document ID: 19850003644, Acquisition Source: LegacyCDMS, Accession Number: 85N11952. Ott. 1984. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19850003644>.
- [56] H. S. Bridge et al. «Plasma observations near Uranus: Initial results from Voyager 2». In: *Science* 233.4759 (1986), pp. 89–94. DOI: 10.1126/science.233.4759.89. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.233.4759.89>.
- [57] J. W. Belcher, H. S. Bridge e L. F. Burlaga. *The plasma environment of Uranus*. Rapp. tecn. NASA NTRS 19920036095. NASA, 1991. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920036095>.
- [58] K. Wiesemann. «A Short Introduction to Plasma Physics». In: *CAS - CERN Accelerator School: Ion Sources*. 2013, pp. 85–122. DOI: 10.5170/CERN-2013-007.85. arXiv: 1404.0509 [physics.plasm-ph].
- [59] J. W. Belcher, Jr. McNutt R. L. e J. D. Richardson. «Thermal plasma in outer planet magnetospheres». In: *Advances in Space Research* 10.1 (1990), pp. 5–11. DOI: 10.1016/0273-1177(90)90081-A. URL: <https://lasp.colorado.edu/mop/files/2015/04/Belcher1990.pdf>.

- [60] Edward C. Sittler Jr., Keith W. Ogilvie e Richard Selesnick. «Survey of electrons in the Uranian magnetosphere: Voyager 2 observations». In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 92.A13 (1987), pp. 15263–15281. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA092iA13p15263>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JA092iA13p15263>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA092iA13p15263>.
- [61] L. A. Frank et al. *Plasmas in Saturn's Magnetosphere*. Preprint (Draft being sent to journal) U-OF-IOWA-80-12 / AD-A096079. Document ID 19810013460; work of the U.S. Government – public use permitted. University of Iowa, Iowa City, IA; NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, apr. 1980. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19810013460.pdf>.
- [62] F. Allegrini et al. «Electron Partial Density and Temperature Over Jupiter's Main Auroral Emission Using Juno Observations». In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126.9 (2021). e2021JA029426 2021JA029426, e2021JA029426. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JA029426>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021JA029426>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021JA029426>.
- [63] S. S. Shapiro e M. B. Wilk. «An analysis of variance test for normality (complete samples)†». In: *Biometrika* 52.3-4 (dic. 1965), pp. 591–611. ISSN: 0006-3444. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591. eprint: <https://academic.oup.com/biomet/article-pdf/52/3-4/591/962907/52-3-4-591.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.
- [64] SciPy community. *scipy.stats.shapiro — Shapiro–Wilk test for normality*. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.shapiro.html>. Accessed: 2025-11-26.
- [65] R. B. D'Agostino e E. S. Pearson. «Tests for departure from normality. Empirical results for the distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$ ». In: *Biometrika* 60.3 (1973), pp. 613–622. DOI: 10.1093/biomet/60.3.613.
- [66] SciPy community. *scipy.stats.normaltest — D'Agostino and Pearson's test for normality*. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.normaltest.html>. Accessed: 2025-11-26.
- [67] SciPy community. *scipy.optimize.curve_fit — Usernon-linear least squares to fit a function*. https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html. Accessed: 2025-11-26.
- [68] D. A. Gurnett e A. Bhattacharjee. *Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications*. Cambridge University Press, 2005.
- [69] E. Roussos et al. «Plasma and fields in the wake of Rhea: 3-D hybrid simulation and comparison with Cassini data». In: *Annales Geophysicae* 26.3 (2008), pp. 619–637. DOI: 10.5194/angeo-26-619-2008. URL: <https://angeo.copernicus.org/articles/26/619/2008/>.

- [70] N. M. Pilkington et al. «Internally driven large-scale changes in the size of Saturn's magnetosphere». In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120.9 (2015), pp. 7289–7306. DOI: 10.1002/2015JA021290. URL: <https://doi.org/10.1002/2015JA021290>.
- [71] Andrew F. Cheng, S. M. Krimigis e L. J. Lanzerotti. «Energetic particles at Uranus.» In: *Uranus*. A cura di J. T. Bergstralh, E. D. Miner e M. S. Matthews. 1991, pp. 831–893.
- [72] J. Saur et al. «Magnetospheric interactions with satellites». In: *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*. A cura di F. Bagenal, T. E. Dowling e W. B. McKinnon. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004, pp. 537–560. ISBN: 9780521818087.
- [73] U. Samir, K. H. Wright e N. H. Stone. «The expansion of a plasma into a vacuum: Basic phenomena and processes and applications to space plasma physics». In: *Reviews of Geophysics* 21.7 (1983), pp. 1631–1646. DOI: 10.1029/RG021i007p01631.
- [74] G. V. Khazanov et al. «Inner magnetospheric superthermal electron transport: Photoelectron and plasma-sheet electron sources». In: *Journal of Geophysical Research* 103.A10 (1998), pp. 23, 485–23, 501. DOI: 10.1029/98JA02291. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19990071231/downloads/19990071231.pdf>.
- [75] B. H. Mauk et al. «The hot plasma and radiation environment of the Uranian magnetosphere». In: *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 92.A13 (1987), pp. 15283–15308. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA092iA13p15283>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JA092iA13p15283>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JA092iA13p15283>.
- [76] I. J. Cohen et al. «A Localized and Surprising Source of Energetic Ions in the Uranian Magnetosphere Between Miranda and Ariel». In: *Geophysical Research Letters* 50.8 (2023). e2022GL101998 2022GL101998, e2022GL101998. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL101998>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2022GL101998>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022GL101998>.
- [77] S. Simon et al. «Plasma wake of Tethys: Hybrid simulations versus Cassini MAG data». In: *Geophysical Research Letters* 36.4 (2009). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GL036943>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008GL036943>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008GL036943>.
- [78] W. M. Farrell, M. L. Kaiser e J. T. Steinberg. «Electrostatic instability in the central lunar wake: A process for replenishing the plasma void?» In: *Geophysical Research Letters* 24.9 (1997), pp. 1135–1138. DOI: <https://doi.org/10.1029/97GL00878>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/97GL00878>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97GL00878>.

- [79] R. Modolo et al. «Plasma environment in the wake of Titan from hybrid simulation: A case study». In: *Geophysical Research Letters* 34.24, L24S07 (ott. 2007), L24S07. DOI: 10.1029/2007GL030489.
- [80] S. M. Krimigis et al. «The Magnetosphere of Uranus: Hot Plasma and Radiation Environment». In: *Science* 233.4759 (1986), pp. 97–102. DOI: 10.1126/science.233.4759.97. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.233.4759.97>. URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.233.4759.97>.
- [81] C. S. Arridge et al. «Uranus Pathfinder: exploring the origins and evolution of Ice Giant planets». In: *Experimental Astronomy* 33.2 (2012), pp. 753–791.
- [82] NASA. *Uranus Orbiter and Probe: A Planetary Mission Concept for the 2023-2032 Decadal Survey*. Rapp. tecn. Mission concept study; “Ice Giant” outer-planet exploration. NASA Science Mission Directorate, 2023. URL: <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/10/uranus-orbiter-and-probe.pdf>.
- [83] I. J. Cohen et al. «Uranus Orbiter and Probe (UOP): The 2023-2032 Planetary Survey and Astrobiology Decadal Survey Mission Concept». In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2023. AGU Fall Meeting Abstracts. Dic. 2023, P34A-01, P34A-01.