



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Studio dell’atmosfera di Europa e sua futura esplorazione

Relatore

Prof.ssa Monica Lazzarin

Correlatore

Dr.ssa Alessandra Migliorini

Laureando

Alessandro Chiarello

Anno Accademico 2022/2023



## INDICE

<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>1. Satelliti Galileiani ed ambiente gioviano</b>	<b>6</b>
1.1 Compendio storico . . . . .	6
1.2 Io . . . . .	6
1.3 Europa . . . . .	8
1.4 Ganimede . . . . .	9
1.5 Callisto . . . . .	11
1.6 Ambiente gioviano . . . . .	12
<b>2. Atmosfera di Europa</b>	<b>14</b>
2.1 Composizione e rilevamento . . . . .	14
2.1.1 Osservazioni dell’Hubble Space Telescope . . . . .	15
2.1.2 La sonda Cassini . . . . .	18
2.2 Ionosfera e specie minori . . . . .	20
<b>3. Superficie di Europa e Struttura interna</b>	<b>23</b>
3.1 Superficie . . . . .	23
3.2 Effetti attesi sulla superficie . . . . .	24
3.3 Oceano interno . . . . .	26
<b>4. Missioni spaziali e prospettive future</b>	<b>27</b>
4.1 Jupiter ICy moons Explorer: JUICE . . . . .	27
4.1.1 Obiettivi . . . . .	27
4.1.2 Strumentazione . . . . .	28
4.2 Europa Clipper Mission . . . . .	31
4.2.1 Obiettivi . . . . .	31
4.2.2 Strumentazione . . . . .	32
<b>5. Conclusione</b>	<b>35</b>

**Riferimenti bibliografici**

**36**

**Sitografia**

**38**

**Abstract:**

Questo elaborato vuole presentare un punto di vista generale su Europa e l'ambiente Gioviario in cui il satellite orbita. Nel primo capitolo si illustra brevemente il percorso storico che ha interessato questa luna e gli altri satelliti Galileiani: Io, Ganimede e Callisto per poi andare ad evidenziare le loro caratteristiche dinamiche e fisiche generali. Proseguendo, nel secondo capitolo si affronta il tema dell'atmosfera di Europa, partendo da un punto di vista osservativo, ovvero si illustrano le osservazioni fatte e gli strumenti utilizzati, per poi descrivere gli strati più esterni che compongono l'atmosfera e le specie minori rilevate.

Nel capitolo successivo si illustra la struttura superficiale di Europa, prestando particolare attenzione ai fenomeni ai quali è esposta e sottolineando l'importanza della mutua influenza tra superficie e magnetosfera di Giove. A conclusione del terzo capitolo si introduce brevemente la questione dell'oceano interno di Europa. Nell'ultimo capitolo si presentano le missioni principali che riguardano il sistema gioviano e i satelliti Galileiani in particolare: JUICE e Europa Clipper Mission, illustrandone rispettivamente obiettivi e strumentazione con i target osservativi associati.

# 1 Satelliti Galileiani ed Ambiente gioviano

## 1.1 Compendio storico

I satelliti principali di Giove: Io, Europa, Ganimede e Callisto, osservati per la prima volta da Galileo all'inizio dell'anno 1610, furono, per lungo tempo, al centro di molti studi da parte della comunità scientifica. Inizialmente Galileo stesso li studiò dal punto di vista dinamico, potendo avvalorare la nascente teoria copernicana e concludendo che i quattro corpi erano in orbita attorno a Giove stesso.

Sul finire del secolo lo scienziato danese Ole Rømer, studiando i tempi delle eclissi di Io riuscì a verificare, sperimentalmente, come la velocità della luce fosse finita, fornendo tuttavia solo una stima per l'epoca. Nei decenni successivi, si cercò di spiegare il moto dei satelliti Galileiani attorno a Giove al fine di raffinare i calcoli dei periodi orbitali ed effemeridi.

L'obiettivo principale di queste misure era di ricavare la longitudine, un grosso problema per gli esploratori di quell'epoca che volevano determinare la propria posizione durante le spedizioni. Nel 1788 Pierre Simon Laplace, infine, riuscì a produrre un modello teorico, il quale spiegò la dinamica dei satelliti Galileiani.

In seguito, con il progresso della tecnologia, dai telescopi alle osservazioni, fu possibile ottenere sempre maggiori dettagli. Ma solo con l'avvio dell'era spaziale iniziarono ad arrivare risultati significativi e altri se ne avranno con la missione JUICE attualmente in corso verso il sistema gioviano.

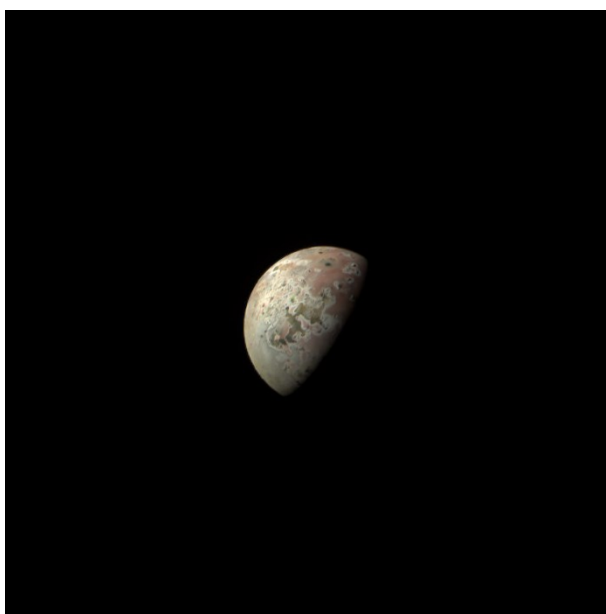
## 1.2 Io

Io, illustrato in figura 1, è il satellite galileiano più interno dei quattro, con un diametro di 3643 km. Orbita attorno a Giove a una distanza di circa 421 700 km, (un perigiove di 420 000 km e un apogiove di 423 400 km), in 1d 18h 27m 33.5s. È il satellite con densità maggiore tra i Galileiani,  $3.53 \text{ g/cm}^3$ , i quali presentano una densità decrescente rispetto alla distanza da Giove. Trovandosi in una posizione interna, questo satellite presenta delle caratteristiche peculiari ed uniche; le forze mareali indotte dalla vicinanza con Giove e dalle risonanze con

Europa e Ganimede, causano stress e compressioni nel satellite, il quale subendo conseguentemente un riscaldamento presenta una forte attività vulcanica.

Questo comportamento, classifica Io come l'oggetto geologicamente più attivo nel sistema solare e ne definisce molte delle sue caratteristiche osservabili. La sua superficie, analizzata dalle sonde Voyager 1 e 2, risulta molto simile a quella dei pianeti rocciosi, composta da rocce silicatiche. Quest'ultima appare giovane, quasi priva di crateri da impatto, come conseguenza del continuo processo di "resurfacing", con vulcani e segni evidenti di colate laviche. La sua attività superficiale fu confermata dalla sonda Voyager 2. La composizione interna fu studiata dalla sonda Galileo, grazie alla quale si ipotizzò l'esistenza di un nucleo ferroso di almeno 900 km di raggio.

Questa intensa attività vulcanica non solo rimodella la superficie della luna, ma ha delle ripercussioni sulla sua tenue atmosfera. La composizione atmosferica include: diossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ) come componente principale, zolfo (SO), cloruro di sodio (NaCl), zolfo atomico e ossigeno. La fonte principale di  $\text{SO}_2$  sono proprio le emissioni vulcaniche. Il gas nell'atmosfera interagisce poi con la magnetosfera di Giove e a seconda del suo stato neutro o ionizzato confluisce in nubi neutre che circondano la luna stessa, oppure in fasce di radiazione della magnetosfera stessa. Il materiale che riesce a sfuggire all'influenza di Io va a formare un toro di plasma con il quale condivide l'orbita e allo stesso tempo co-ruota con la magnetosfera di Giove.



**Fig. 1** Io fotografato dalla sonda Juno. Credit to NASA/JPL

### 1.3 Europa

Europa, mostrato in figura 2, è il quarto satellite per dimensioni nel sistema gioviano con diametro medio pari a 3 121 km; un periodo orbitale di circa 3d 13h 13m 42s e un'orbita di raggio medio pari a 671 034 km. Dal punto di vista superficiale, Europa presenta numerosi tratti distintivi di una attività geologica recente; infatti, si riscontrano pochi crateri da impatti meteoritici e dalle immagini acquisite dalla sonda Galileo tra il 1996 e il 1997 si osservano in modo evidente delle fratture dette "ice rafts", zone rugose e zone lisce rese tali da eruzioni di materiale proveniente dall'interno.

Una possibile interpretazione dell'alto numero di fratture superficiali si può ricercare nell'effetto mareale a cui la luna è sottoposta, a causa di Giove e della risonanza orbitale con Io e Ganimede. L'intensa interazione gravitazionale deforma Europa e genera calore internamente alla luna. Questo fenomeno può essere ritenuto responsabile anche del mantenimento di un oceano interno, sottostante la crosta ghiacciata.

Questa ipotesi fu avvalorata dai rilevamenti di un debole momento magnetico indotto, dovuto presumibilmente ad un oceano di acqua salata, come osservato dalla sonda Galileo. Tale ipotesi fu accertata nel 2014 grazie alle osservazioni nel FUV (far-ultraviolet) di "water plumes" con il Hubble Space Telescope (HST), ovvero emissioni di vapore acqueo proveniente dagli strati interni, durante il transito davanti a Giove (Sparks et al 2016). Misure condotte già nel 1994 (Savage et al., 1995), utilizzando lo spettrografo di HST, permisero di individuare una tenue atmosfera di O<sub>2</sub> di origine non biologica, probabilmente prodotto a seguito dell'interazione tra la radiazione solare e la superficie stessa di Europa. Il gas atmosferico interagisce a sua volta con l'ambiente gioviano, in cui la luna è immersa.





**Fig. 2** Europa ripreso dalla sonda Juno in colori naturali. Credit to: NASA/JPL

#### **1.4 Ganimede**

È il satellite maggiore tra i quattro principali e addirittura in tutto il sistema solare. Ganimede presentato in figura 3, possiede un diametro di 5262 km, superando anche Mercurio, ma con una densità pari a  $1.942 \text{ g/cm}^3$ . Si trova ad una distanza media da Giove di circa 1 070 400 km, è il secondo più distante tra i Galileiani e ha un periodo orbitale pari a 7d 9h 16m 23.45s. Come suggerito dalla sua densità, la luna risulta principalmente composta da ghiaccio d'acqua e materiali rocciosi mentre la superficie mostra due diversi tipi di terreno: regioni più scure e ricche di crateri, dette "dark terrain", che identificano aree antiche e costituiscono circa un terzo della superficie; regioni più chiare, di formazione più recente e poco craterizzate, le quali coprono la restante parte, dette "bright terrain".

Le zone più giovani sono caratterizzate da scarpate e dirupi di natura tettonica a seguito degli stress causati da effetti mareali. Si osservano anche strutture di origine criovulcanica. Per criovulcanismo si intende l'insieme dei fenomeni di natura vulcanica individuati sui corpi ghiacciati del sistema solare, che prevedono, al contrario del vulcanismo dei pianeti rocciosi,

l'eruzione di acqua, composti del metano o ammoniaca. Al contrario di Io, l'attività criovulcanica di Ganimede non contribuisce all'atmosfera, la quale risulta tenue e composta principalmente di ossigeno ( $O_2$ ) come rivelato da HST. L'ossigeno deriva principalmente dalla separazione delle molecole di ghiaccio d'acqua, in idrogeno (H), che si disperde molto rapidamente, e in ossigeno. L'aspetto più interessante ed unico di Ganimede è il campo magnetico proprio e indipendente dalla magnetosfera di Giove, che la sonda Galileo ha rivelato durante sei fly-by tra il 1995 e il 2000. Poiché dotato di una intensità considerevole, circa  $719 \pm 2$  nT all'equatore, il campo riesce a generare anche una magnetosfera interna a quella gioviana.

Oltre a quello proprio, Ganimede ne possiede anche uno indotto, come Callisto ed Europa, il quale suggerisce la presenza di acqua liquida sottostante alla superficie in grado di condurre correnti elettriche (Kivelson et al., 2002).



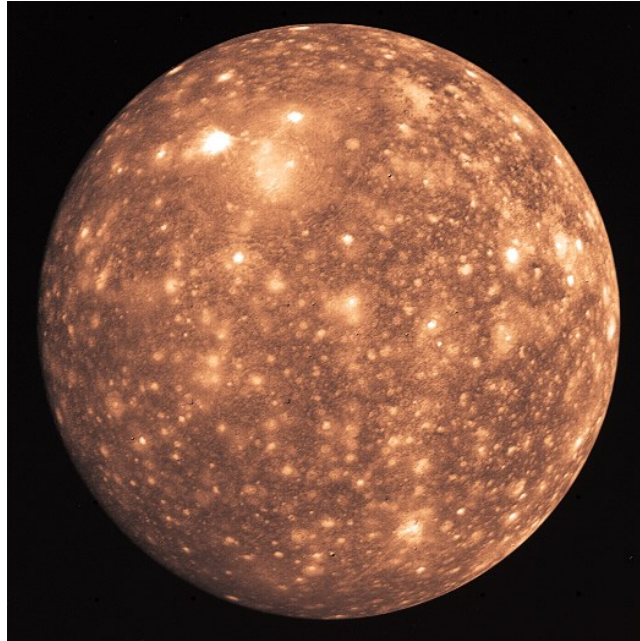
**Fig. 3** Ganimede fotografato dalla sonda Juno nel 2021. Credit to: NASA/JPL

## 1.5 Callisto

Callisto, illustrato in figura 4, è il satellite galileiano più esterno tra i quattro, con un periodo orbitale che misura circa 16.68 giorni e il secondo in dimensioni con un diametro di 4821 km. A causa della distanza media da Giove di 1 882 700 km, sensibilmente superiore a quella di Ganimede, Callisto non rientra nella risonanza orbitale che include i tre satelliti più interni: Io, Europa e Ganimede. In termini strutturali, Callisto, non sembra sia ben definito, infatti, i dati forniti dalla sonda Galileo rivelano una parziale stratificazione tra ghiaccio al 50 % e roccia in una percentuale non ben definita, con una densità media del satellite di  $1.83 \text{ g/cm}^3$  (Anderson et al., 2001).

Callisto detiene il primato di satellite naturale più craterizzato nel sistema solare, il quale, a differenza di Ganimede, non presenta segni di attività geologica propria. Questo aspetto può essere attribuito in parte sia ad un'atmosfera tenue di  $\text{CO}_2$  (Carlson et al. 1993) e  $\text{O}_2$  (Liang et al. 2005) che poco influenza la superficie con effetti erosivi e sia all'isolamento dinamico da Giove. Quest'ultima caratteristica sembra aver garantito a Callisto una certa immunità da eventi mareali e gravitazionali, i quali avrebbero certamente influenzato la sua struttura interna e superficiale. Allo stesso modo il flusso di particelle appartenenti alla magnetosfera gioviana ha un leggero impatto sulla superficie di Callisto, influenzandola in minima parte. Un aspetto che lega questa luna, apparentemente isolata dalle altre, a Ganimede ed Europa, è la possibile presenza di un oceano interno (Zimmer et al., 2000)

Tale ipotesi fu verificata indirettamente studiando il campo magnetico di Giove. Infatti, Callisto non ne ha uno proprio ma bensì ne possiede uno indotto, il quale varia direttamente in base alla configurazione del satellite rispetto a Giove, suggerendo la presenza sotto la superficie di un fluido conduttivo.



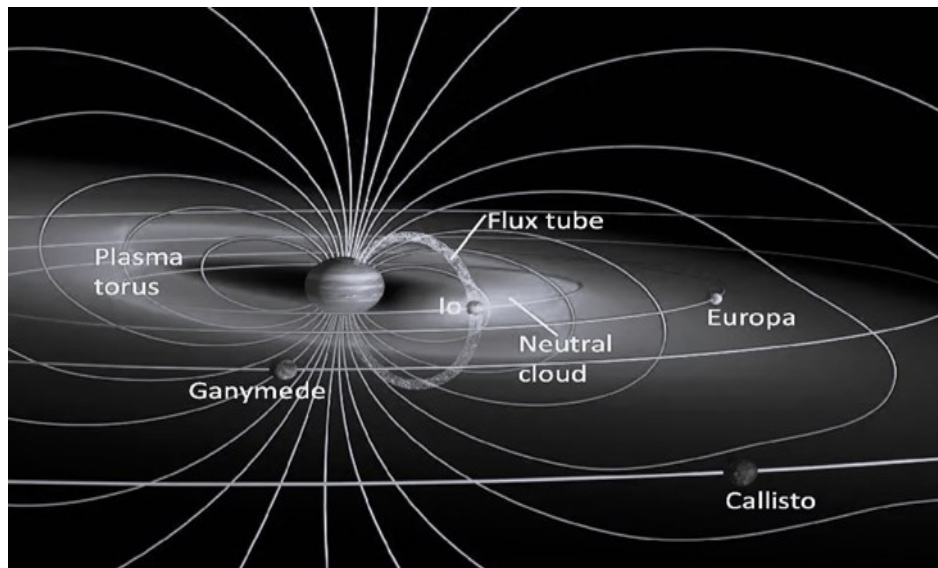
**Fig. 4** Io fotografato dalla sonda Voyager 2. Credit to: NASA/JPL

## 1.6 Ambiente gioviano

Come illustrato nei paragrafi precedenti, molte caratteristiche che contraddistinguono i satelliti Galileiani, derivano direttamente dalla vicinanza a Giove. A seconda della loro distanza, infatti, le lune interagiscono con le diverse componenti gioviane: gravitazionale e magnetosferica. La prima si manifesta direttamente nei parametri orbitali delle sue lune, la maggior parte dei satelliti interni a Callisto, compreso, possiede una rotazione sincrona, come la Luna con la Terra. Il campo gravitazionale di Giove ha un raggio d'azione che va oltre ai suoi satelliti principali; infatti, è responsabile anche di molte catture di oggetti transistanti verso il sistema solare interno (ad esempio la cometa Shoemaker-Levy nel 2009, che fu catturata da Giove e finì per disintegrarsi). In ultima analisi, il campo gravitazionale di Giove, in partecipazione alle risonanze orbitali tra i satelliti Galileiani, produce effetti di stress mareale su di essi.

Questi effetti sono ritenuti almeno in parte responsabili di un meccanismo di riscaldamento che le lune di Giove, escluso Callisto a causa della sua lontananza, subiscono. La componente magnetosferica di Giove gioca un ruolo fondamentale, in collaborazione con le particelle provenienti dal Sole, nell'interazione con le sue lune. Il forte campo magnetico, generato dalle correnti dovute all'idrogeno "metallico" contenuto negli strati più interni del pianeta, riesce a produrre una magnetosfera senza eguali in dimensioni tra i pianeti del sistema solare. La sua

principale fonte di mantenimento per il plasma che la compone è proprio Io (come mostrato *in situ* dalla sonda Voyager), grazie alle sue continue emissioni di materiale per via vulcanica. Inoltre, le particelle energetiche presenti nella magnetosfera nella regione equatoriale, dove orbitano i satelliti con una leggera inclinazione, interagiscono con la superficie di questi, espellendone materiale e alterandone le proprietà. Di seguito, è mostrata nella figura 5 la ricostruzione della posizione dei satelliti Galileiani relazione alla magnetosfera



**Fig. 5.** In questa ricostruzione digitale viene mostrata la forte interazione di Io ed Europa con la magnetosfera di Giove, la quale però si estende oltre le rispettive orbite. Credit: John Spencer, Southwest Research Institute.

## 2 Atmosfera di Europa

### 2.1 Composizione e rilevamento

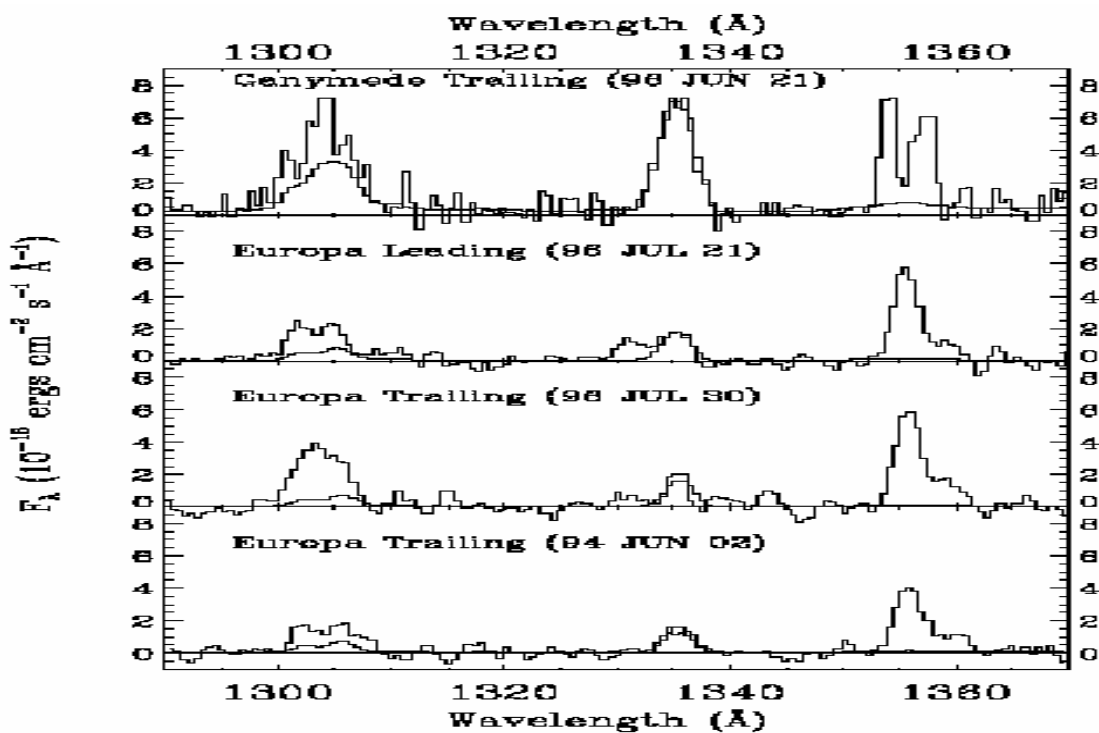
L'atmosfera sottile di Europa è prodotta generalmente da due fenomeni dominanti: la radiolisi e lo "sputtering". Per radiolisi si intende la scissione di legami molecolari per effetto di radiazioni ionizzanti. Lo "sputtering" invece consiste nell'espulsione di atomi e molecole dalla superficie, a causa di ioni incidenti sufficientemente energetici, per trasferimento di momento collisionale o per eccitazione elettronica delle molecole colpite.

Questi due fenomeni, con un minore contributo della sublimazione del ghiaccio d'acqua, regolano la composizione dell'atmosfera di Europa. I componenti principali saranno quindi elementi derivati dalla superficie ghiacciata stessa, principalmente  $O_2$  e  $H_2$  in minor parte a causa della loro non-condensabilità e bassa tendenza a reagire. L'ossigeno tenderà ad essere l'elemento dominante, derivato dalla superficie via sputtering a causa delle radiazioni ultraviolette e particelle cariche, le quali, colpendo la superficie ghiacciata, producono molecole di vapore d'acqua, successivamente divise in ossigeno ed idrogeno. Quest'ultimo sarà poi sufficientemente leggero da poter sfuggire all'attrazione gravitazionale di Europa.

Il rilevamento delle specie presenti nell'atmosfera di Europa è stato possibile grazie a numerose osservazioni, sfruttando sia le sonde che hanno approcciato il sistema gioviano, sia i telescopi spaziali, come ad esempio Hubble Space Telescope (HST).

## 2.1.1 Osservazioni dall'Hubble Space Telescope

Il primo set di dati riguardante l'atmosfera di Europa fu ottenuto nel 1994, usando il Goddard High Resolution Spectrograph (GHRS) di HST e grazie a queste osservazioni, riassunte in figura 6, furono scoperte le emissioni associate alle righe semi-proibite di OI a 1356 Å e a 1304 Å (Hall et al. 1995). Dalle misure fu possibile determinare il rapporto tra le intensità delle emissioni di queste due righe e successivamente concludere che esse risultavano dalla dissociazione dell'O<sub>2</sub> ad opera di elettroni impattanti.



**Fig. 6** Spettri ottenuti da Hall et al. (1995) che indicano le emissioni dell'ossigeno a 1305 Å e 1356 Å e rappresentano la prima prova diretta di una atmosfera composta di O<sub>2</sub> appartenente ad Europa.

Queste righe di emissione rappresentarono una concreta e diretta osservazione dell'atmosfera di Europa. Per questa serie di osservazioni furono presi in considerazione altri possibili fattori contribuenti alle emissioni ultraviolette rilevate:

- (1) Scattering da parte degli atomi di O nell'atmosfera terrestre

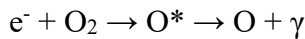
(2) Linee di emissione solari e fotoni dal continuo, riflessi dalla superficie di Europa

(3) Scattering da parte degli atomi di O nell'atmosfera di Europa

(4) Eccitazione dell'ossigeno a causa dell'impatto con elettroni,



(5) Dissociazione dell'O<sub>2</sub> a causa di impatto con elettroni,

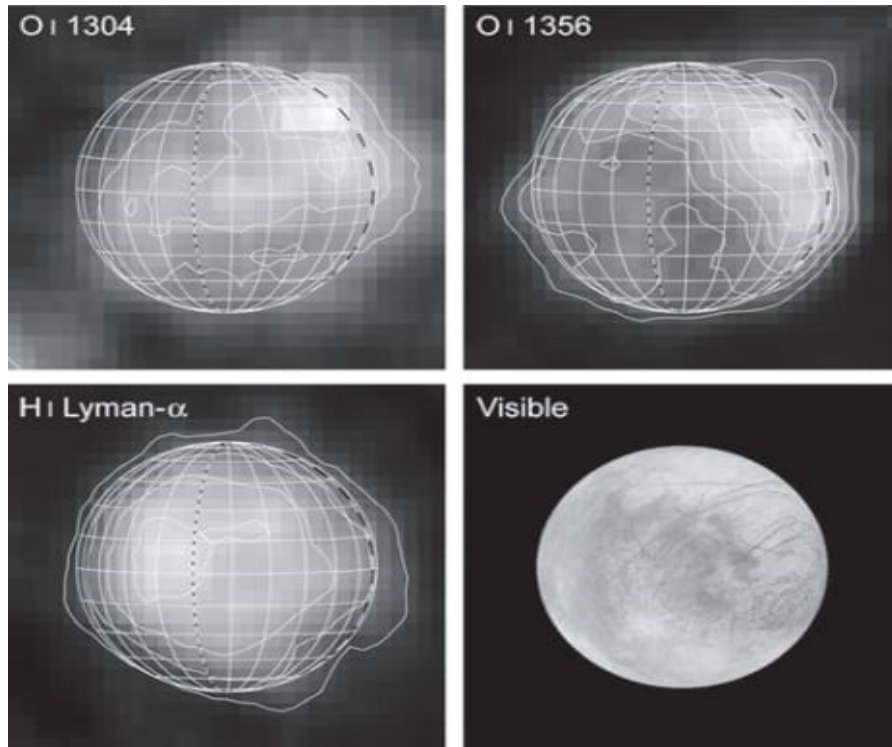


Le osservazioni portate a termine da Hall et al. furono condotte mentre HST si trovava in ombra rispetto alla Terra, così da minimizzare il contributo dal processo (1). Il processo (2), sebbene responsabile della riga di emissione del CII a 1335 Å, non contribuisce alla riga semi proibita dell'OI a 1356 Å. Il processo (3) da un contributo trascurabile alle emissioni dell'ossigeno di Europa. Infine, direttamente dal rapporto in intensità tra le due righe di emissione dell'ossigeno rilevate, permise di concludere che: il processo (5) domina rispetto al numero (4) e l'atmosfera di Europa è composta principalmente da O<sub>2</sub> (cit. "Hall et al., 1995, 1998" in "McGrath et al., Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, 2009").

Nel 1999 un'ulteriore serie di osservazioni di Europa fu ottenuta, utilizzando lo Space Telescope Imaging Spectrograph (STIS) di HST. Come nel caso precedente fu osservato l'emisfero opposto alla direzione del moto orbitale, detto "trailing hemisphere" e coprendo un range tra i 1150 Å e i 1720 Å della lunghezza d'onda.



Da queste osservazioni si ottennero immagini monocromatiche di Europa, mostrate in figura 7, nelle righe di emissioni di: HI Lyman- $\alpha$  a 1215.67 Å, OI a 1304 Å, CII a 1335 Å e OI a 1356 Å.



**Fig. 7.** Immagini monocromatiche ottenute con HST nelle righe di emissione: OI a 1304 Å, OI a 1356 Å e HI Lyman- $\alpha$  a 1215.67 Å ed un'immagine nel range del visibile del medesimo emisfero per confronto.

Il contributo della Lyman- $\alpha$  fu attribuito ai fotoni solari riflessi dalla superficie ghiacciata (processo (2)), il contributo della riga OI a 1304 Å fu attribuito sia all'emissione dell'ossigeno atmosferico della luna gioviana (processi (4) e (5)) sia all'emissione solare riflessa dalla superficie (processo (2)) mentre il contributo della riga OI a 1356 Å fu attribuito interamente all'emissione dell'atmosfera di Europa.

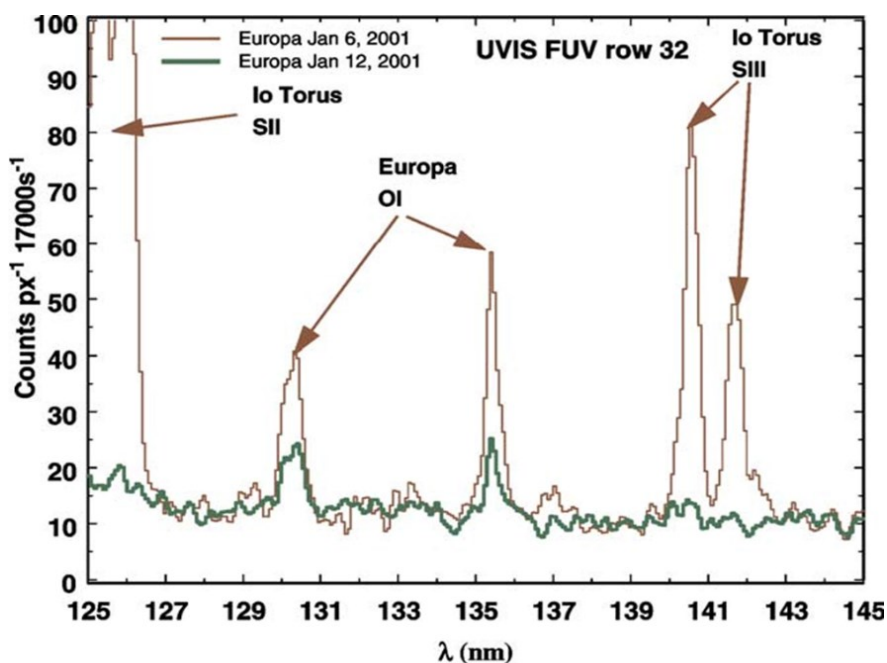
L'immagine monocromatica, mostrata in figura 7, associata alla riga OI a 1356 Å mostrò il picco di intensità all'interno del disco che delimita il profilo della luna e non al bordo. L'interpretazione di questa peculiarità suggerì che, mentre il picco al bordo avrebbe indicato una interazione tra il plasma e l'atmosfera otticamente spessa, il massimo di intensità all'interno del disco fosse dovuto o ad una non-uniformità del gas neutro "sputtered" (i.e. espulso) dalla superficie, oppure agli effetti del plasma non uniforme che stimola le emissioni. Europa, tuttavia, non possiede un campo magnetico indotto da Giove sufficientemente forte, per poter

deviare un flusso di particelle cariche grande abbastanza da giustificare lo “sputtering” solo in alcune regioni superficiali (cit.” Kivelson et al., 1997” in “McGrath et al., Observations of Europa’s Tenuous Atmosphere, 2009“).

Il confronto tra le immagini nel visibile con quella corrispondente alla Lyman- $\alpha$ , invece, evidenziò una possibile correlazione tra le zone più brillanti nel visibile e le zone più scure nella Lyman- $\alpha$ . Questa corrispondenza la si può attribuire alle variazioni dell’albedo superficiale, poiché le regioni particolarmente chiare sono generalmente attribuite al ghiaccio d’acqua puro, il quale risulta molto scuro nell’ultravioletto (McGrath et al., 2009).

### 2.1.2 La sonda Cassini

Le osservazioni dei satelliti galileiani furono acquisite dalla sonda Cassini tra Dicembre 2000 e Gennaio 2001, mentre si dirigeva verso Saturno. L’obiettivo principale fu quello di consolidare il rilevamento di una tenue atmosfera di ossigeno su Europa e, allo stesso tempo, di confrontare i dati ottenuti dalle osservazioni precedenti da parte di HST, in una diversa



**Fig.8.** Spettro ottenuto tramite UVIS nel lontano ultravioletto, in data 6 Gennaio 2001 e comparato con quello ottenuto il 12 Gennaio. Lo spettro mostra le emissioni dell’ossigeno atomica OI a 130.4 nm, OI a 135.6 nm, dovute ad Europa. Le altre bande attorno a 140 nm, 142 nm e 125-127 nm, presenti solo nello spettro acquisito il 6 Gennaio, sono dovute al toro di plasma generato da Io, perché il 12 Gennaio il toro di Io non era presente nel campo di vista di UVIS.

posizione orbitale. Lo spettro, mostrato in figura 8, fu ottenuto utilizzando l'UltraViolet Imaging Spectrograph (UVIS), in un range compreso tra 1115 e 1914 Å.

Come mostrato in figura 3, le emissioni non attribuite all'ossigeno sono dovute al toro di plasma del satellite Io. Dalla riga a 133.6 nm, si derivò l'albedo pari a circa 1 %, consistente con quello calcolato da HST compreso tra 1.3 -1.6 % (McGrath et al., 2009).

Da queste misure furono derivate le abbondanze atomiche e molecolari dell'ossigeno, presentate in tabella 1 ed essendo valori derivati e basati sul flusso osservato dallo strumento, tengono conto di assunzioni sull'altezza di scala dell'atmosfera e dell'energia e densità elettronica.

L'approssimazione a sorgente puntiforme permise di ottenere la migliore interpolazione della riga di emissione a 1356 Å, consistente con una atmosfera di O<sub>2</sub> di altezza di scala di circa 200 km ed una temperatura di 1000 K. Lo spettro però risultò meglio approssimato includendo una percentuale del 2% di ossigeno atomico nell'atmosfera di O<sub>2</sub> e una tenue componente estesa di OI oltre l'atmosfera legata. Questo dato rappresentò una sorprendente differenza rispetto alle prime misure fatte con HST, non rilevate da Hall et al. (1995, 1998) poiché Europa occupava l'intero campo di vista della fenditura di GHRIS.

Nel caso delle misure con la sonda Cassini, Europa occupava spazialmente circa un pixel nella fenditura di UVIS alla distanza della sonda di 11.2x10<sup>6</sup> km il 6 Gennaio e 15.8x10<sup>6</sup> km il 12 Gennaio. In queste condizioni fu possibile analizzare anche l'ambiente circostante al satellite Galileiano e rilevare la componente estesa di ossigeno atomico, la quale risultò avere un'estensione di circa 11 000 km durante la misurazione e una densità di ossigeno atomico compresa tra 1000 e 1700 atomi cm<sup>-3</sup>. Tale densità fu misurata usando la formula: (intensità espressa in rayleighsx10<sup>6</sup>) / (cammino in cmxprobabilità di emissione) e assumendo una probabilità di emissione di 6.05x10<sup>6</sup> e un cammino di circa 22 000 km.

Un ulteriore contributo della sonda Cassini fu il rilevamento di un toro di gas neutro nel piano orbitale di Europa tramite lo strumento Ion and Neutral Camera(INCA). Precisamente, fu possibile rilevare gli ENAs (Energetic Neutral Atom) e produrre un'immagine della loro distribuzione nel sistema gioviano (Mauk et al., 2003). La distribuzione mostrò regioni più brillanti con picco poco oltre l'orbita di Europa e questa particolarità fu interpretata con la presenza di un toro di gas neutro. Gli ENAs si formano in seguito allo scambio di carica tramite urto tra ioni energetici intrappolati nella magnetosfera di Giove e gli atomi neutri appartenenti al toro di gas. In seguito allo scambio di carica, gli atomi neutri si ionizzano e gli ioni si

neutralizzano abbandonando poi il sistema. I componenti più probabili di questo toro sono i prodotti della sua superficie ghiacciata e dell'atmosfera di ossigeno: H<sub>2</sub>O, H, H<sub>2</sub>, O, OH. Di seguito, nella tabella 1, si riassumono le specie principali che compongono il sistema atmosferico di Europa.

**Tab. 1** Sommario dell'atmosfera, delle nubi neutre e del toro di gas di Europa.

Species	Density	Location	Reference
O <sub>2</sub>	$(2.4-14) \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	line of sight	1,2,3
	$(3.7-6.2) \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$	mean (H = 200 km)	2
	$(5-10) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$	surface	4,5
O	$(1.7-3.1) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	line of sight	2
	$(0.85-1.5) \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$	mean (H = 200 km)	2
	1000-1700 cm <sup>-3</sup>	<22,000 km	this work
	few $\times 10^4 \text{ cm}^{-3}$	surface	4,5
O/O <sub>2</sub>	<0.1	H ~ 20-300 km	1
	~0.02	H = 200 km	2
n <sub>e</sub> (ionosphere)	peak ~ $10^3-10^4 \text{ cm}^{-3}$	<300 km	6
Na	$(4-0.4) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$	5-25 R <sub>E</sub>	7,8
	~100 cm <sup>-3</sup>	surface	7,8
K	~0.04 $\times$ Na	5-13 R <sub>E</sub>	8
Na/K	25	5-13 R <sub>E</sub>	8
H or H <sub>2</sub> torus	~40 cm <sup>-3</sup>	r ~ 2 R <sub>J</sub> ?	9
O torus	<8 cm <sup>-3</sup>	if r ~ 2 R <sub>J</sub>	2

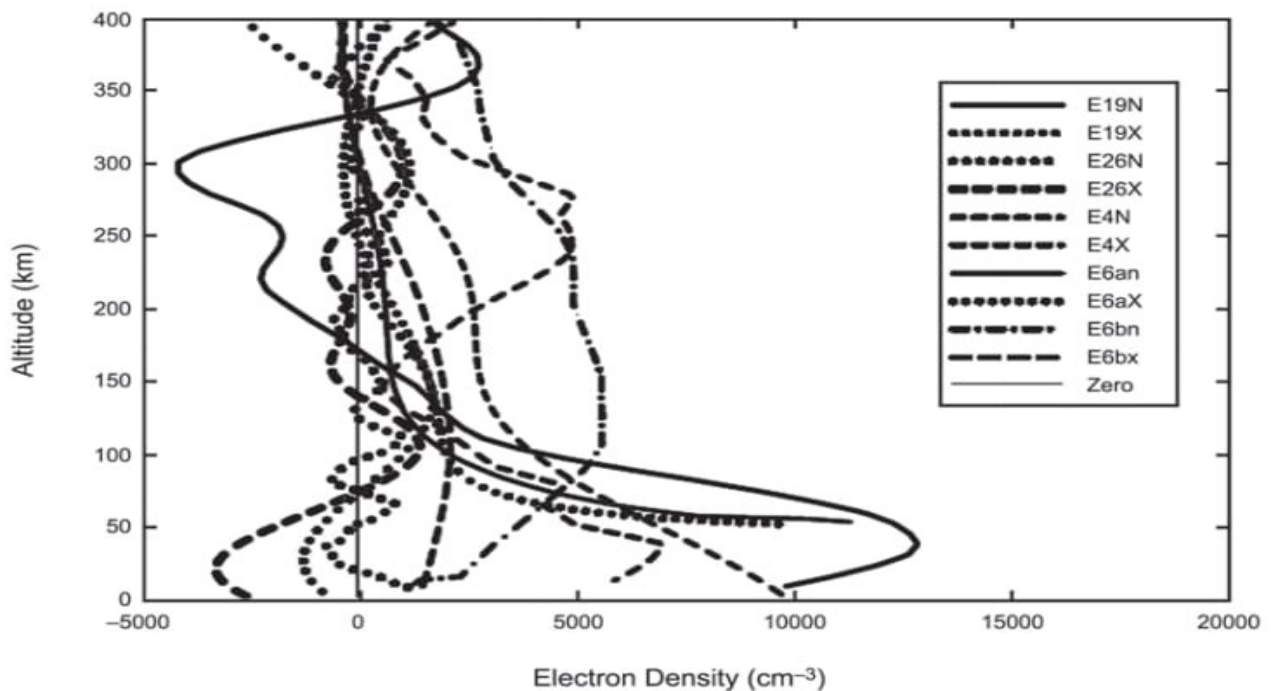
**Referenze:** [1] Hall et al. (1998); [2] Hansen et al. (2005); [3] Saur et al. (1998); [4] Shematovich et al. (2005); [5] Smyth and Marconi (2006); [6] Kliore et al. (1997, 2006); [7] Brown and Hill (1996); [8] Brown (2001); [9] Mauk et al. (2003). "This work" fa riferimento a: McGrath et al., Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, 485-505, 2009.

## 2.2 Ionosfera e specie minori

Per Ionosfera si intende uno strato di plasma prodotto dalla ionizzazione dell'atmosfera neutra tramite il processo di fotoionizzazione o/e ionizzazione da impatto con le particelle cariche. Europa ne possiede una e la sua esistenza fu accertata dalla sonda Galileo nell'arco di 6 occultazioni tra Dicembre 1996 e Febbraio 1997. In questo caso lo strato ionizzato può essere attribuito all'azione della radiazione ultravioletta del Sole o alle particelle energetiche

intrappolate nel campo magnetico di Giove, il quale, per estensione, contiene i satelliti galileiani. (Kilore et al., 1997).

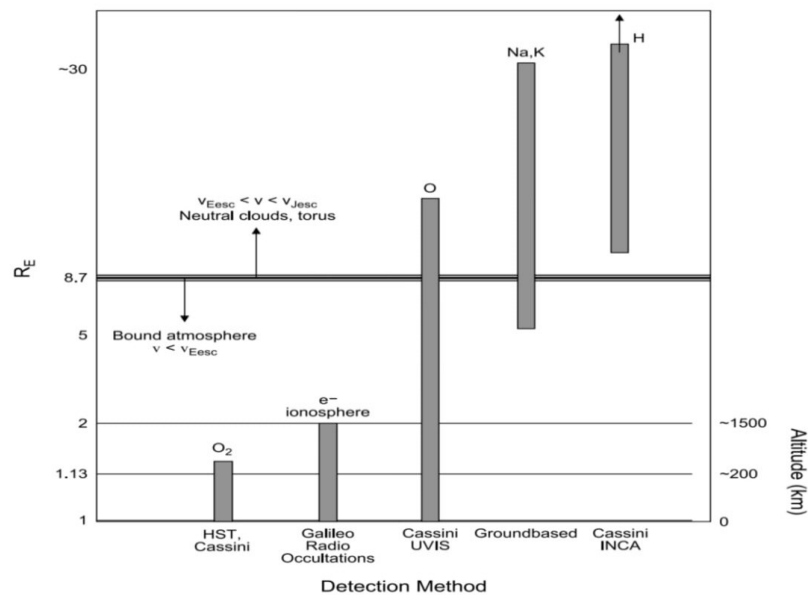
Dai rilevamenti effettuati dalla sonda Galileo, illustrati nella figura 9, fu possibile evidenziare l'esistenza di questo strato tenue ionizzato, con una densità elettronica massima pari a circa  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  vicino alla superficie e con una altezza di scala del plasma pari a 200 km sotto i 300 km di altezza e 400 km sopra i 300 km di altezza. Come mostrato in figura 4, i profili atmosferici ottenuti nel corso delle varie occultazioni sono discordanti, pertanto indicando una disuniformità intrinseca nella Ionosfera stessa. Come suggerito da McGrath et al. (2009), l'incongruenza riscontrata nei risultati può essere superata con una migliore comprensione dell'ambiente gioviano in termini di plasma e magnetosfera tramite delle misurazioni *in situ*.



**Fig. 9** Risultati ottenuti da tutte le occultazioni effettuate dalla sonda Galileo con la relativa nomenclatura che mostrano la disuniformità della Ionosfera di Europa (” Kliore et al., 1997”) in “McGrath et al., Observations of Europa’s Tenuous Atmosphere, 2009“). La lettera “E” con il numero indica l’orbita seguita nell’occultamento, la lettera “N, n” indica un fallito rilevamento nella traiettoria di ingresso, la lettera “X, x” indica un rilevamento in uscita di traiettoria che va dal debole al fallito. Le lettere “a, b” nell’orbita E6 indicano un doppio occultamento nella medesima orbita (” Kliore et al., 2001, 2006” in “McGrath et al., Observations of Europa’s Tenuous Atmosphere, 2009“).

Conoscere le specie minori nell'atmosfera di Europa può dare un importante contributo allo studio degli elementi che costituiscono la superficie del satellite. La specie principale di questa categoria, il Sodio, fu rilevata da un telescopio posizionate a terra dell'università dell'Arizona, già nel Giugno del 1995. Le emissioni associate al doppietto del Sodio, rispettivamente, D1 a 5895.92 Å e D2 a 5889.95 Å, furono rilevato con una intensità tale da giustificare la presenza significativa di Na nelle vicinanze di Europa.

L'emissione di Na risultò visibile oltre i 25 R<sub>E</sub> (i.e. Raggio di Europa) di distanza dalla superficie, implicando una velocità di fuga degli atomi di Na superiore a 2 km s<sup>-1</sup>. In accordo con Brown and Hill (1996), poiché la sublimazione alla superficie, la quale si trova ad una temperatura di 95 K avrebbe prodotto velocità di fuga di circa 0.3 km s<sup>-1</sup>, essi conclusero che il meccanismo principale di immissione di Na nell'atmosfera esterna era lo "sputtering" dovuto alle particelle energetiche provenienti dalla magnetosfera di Giove. Un secondo set di misure spettrometriche fu condotto utilizzando l'High Resolution Echelle Spectrometer (HIRES) dell'osservatorio Keck, ripetendo l'osservazione del Sodio e compiendo rilevamenti anche del doppietto del Potassio a 7664.90 Å e a 7698.96 Å. Questa volta, studiando il rapporto Na/K di Europa e confrontandolo con quello di Io, si intuì la natura endogenica di queste specie. Nella figura 10 sono presentati le specie principali rilevate e il metodo di rilevamento.



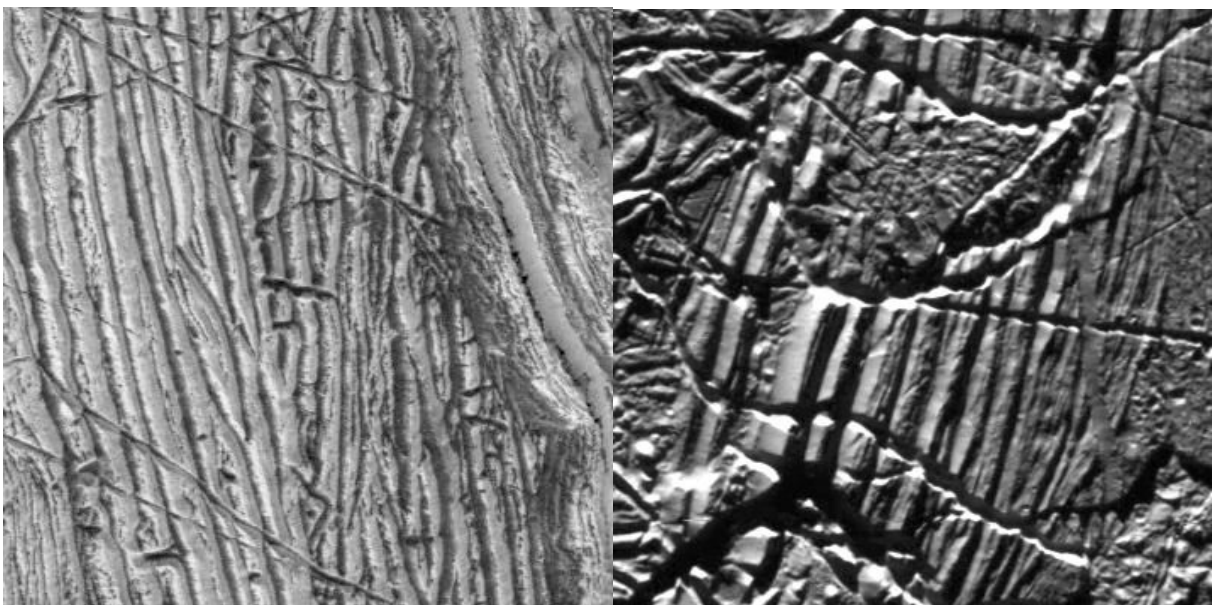
**Fig. 10** Diagramma schematico che mostra le specie rilevate nell'atmosfera di Europa in relazione al metodo di osservazione, alla distanza dalla superficie per le specie più distanti e alla quota per quelle più legate alla superficie. Possiamo definire la regione entro 8.7 R<sub>E</sub> come atmosfera legata nella quale la forza di gravità di Europa domina e la velocità dei costituenti è inferiore alla velocità di fuga (circa 2 km s<sup>-1</sup>). Oltre questa regione le particelle possono o sfuggire a Giove oppure rimanere intrappolate nelle regioni esterne ad Europa e in orbita attorno a Giove. McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, JSTOR, pp. 485-505.

### 3 Superficie di Europa e struttura interna

#### 3.1 Superficie

La superficie di Europa e la sua atmosfera sono strettamente connesse, a tal punto che la composizione della prima determina la seconda attraverso processi di interazione con l'ambiente gioviano e le particelle che lo abitano. La superficie, con un'età relativamente bassa in termini geologici e compresa tra 40 e 90 milioni di anni, è principalmente composta da ghiaccio d'acqua. Durante il periodo compreso tra il 1995 e il 2003 la sonda Galileo poté compiere numerosi flybys di Europa, andando a rivelare una superficie ricca di strutture, alcune delle quali sono mostrate in figura 11. La sonda rilevò fratture della crosta, crinali, macchie rosse dette "lenticulae" e strutture lineari che si estendono per chilometri. Tutto ciò accompagnato da colorazioni che appaiono rossastre e marroni nel visibile, la cui composizione incerta fu associata a composti dello zolfo mischiati con ghiaccio d'acqua e modificati dalle radiazioni.

Questi tratti distintivi suggerirono che la luna fosse geologicamente attiva e che la sua superficie subisse effetti convettivi dovuti presumibilmente ad una fonte di calore interno. Riuscire a identificare gli elementi estranei al ghiaccio d'acqua permetterà di capire la natura endogenica dei materiali superficiali che potrebbero provenire dall'oceano sottostante.



**Fig. 11** Aspetti distintivi della superficie di Europa. Immagine presa dalla sonda Galileo utilizzando il Solid-State Imaging. Credit to NASA/JPL-Caltech.

### 3.2 Effetti attesi sulla superficie

La superficie di Europa gioca un ruolo primario nella formazione dell'atmosfera e ne determina in larga parte la composizione, interagendo direttamente con la magnetosfera di Giove e quindi con la sua popolazione di particelle. Queste interazioni agiscono su più livelli, sia alterando la composizione della superficie stessa (radiolisi), sia inducendo il rilascio di molecole nell'atmosfera e nella magnetosfera stessa (sputtering).

Precisamente, secondo quanto riportato da Johnson et al. (2004), ci sono tre componenti principali con cui la magnetosfera interagisce con la superficie:

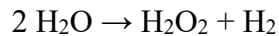
- (1) Plasma a bassa energia presente nella magnetosfera che interagisce con la superficie e contribuisce allo “sputtering” (i.e. espulsione) di materiale superficiale.
- (2) Ioni energetici, i quali espellono atomi neutri nell' ambiente atmosferico via “sputtering”, causano trasporto di materiale sulla superficie di Europa e contribuiscono al suo toro di gas neutro.
- (3) Elettroni ad alta energia e ioni leggeri che alterano la chimica della superficie in quanto sorgente di energia ionizzante.

Questi componenti influenzano la superficie tramite la radiolisi e lo sputtering, alterandone le componenti e modificando la struttura del ghiaccio d'acqua a seconda della energia di cui dispongono e della profondità che riescono a raggiungere. Nel seguito sono fornite le caratteristiche di questi fenomeni (Johnson et al., 2004).



## (1) Radiolisi:

Per radiolisi si intende la rottura dei legami che compongono le molecole ad opera di radiazioni ionizzanti ed energia depositata da particelle cariche. Anche i fotoni energetici nel range dell'UV possono compiere la radiolisi. Facendo riferimento ai paragrafi precedenti, Europa si trova in una regione dell'orbita di Giove nella quale subisce una forte interazione con le particelle e le componenti magnetosferiche presenti. La radiolisi è una delle maggiori responsabili della alterazione chimica superficiale e di conseguenza della composizione atmosferica. Un prodotto principale di questo processo è il perossido di idrogeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, secondo la reazione:



Questa reazione ha dirette implicazioni sulla superficie, tramite lo sputtering, poiché l'H<sub>2</sub> essendo più leggero riuscirà a sfuggire all'attrazione gravitazionale di Europa andando a contribuire alla componente neutra gravitazionalmente legata a Giove. Implicitamente la fuga di H<sub>2</sub> lascerà una superficie più ricca di ossigeno, come principale risultato della radiazione, il quale potrà essere liberato e contribuire all'atmosfera ricca di ossigeno (McGrath et al., 2009). Una parte di O<sub>2</sub> prodotto può rimanere intrappolato nel ghiaccio superficiale e a seguito di movimenti convettivi della crosta può essere portato in profondità, contribuendo all'ossidazione del presunto oceano sottostante di Europa. (Cooper et al., 2001).

Il rilevamento di carbonio nella forma ossidata (Paranicas et al., 2009), CO<sub>2</sub>, suggerisce che il materiale organico emerso dagli strati inferiori della crosta o impiantato a seguito di impatti di corpi esterni, possa subire ossidazione radiolitica. In generale l'irradiazione a cui è esposta la superficie di Europa rappresenta una sfida per la ricerca di forme di vita organica poiché gli ossidanti presenti ne causerebbero la distruzione e le future missioni dovranno tenere conto della loro distribuzione superficiale.

## (2) Sputtering:

Lo sputtering avviene ad opera di particelle ionizzanti, dipende dalla velocità degli ioni e dalla loro carica. Questo fenomeno agisce sulle molecole che compongono gli strati superiori della superficie e ne libera le molecole che vanno poi a popolare l'atmosfera, a redistribuirsi sulla superficie o eventualmente, se sufficientemente leggere come l' $H_2$ , a sfuggire alla gravità di Europa. Le specie neutre che possiedono una velocità superiore a 2 km/s riescono a sfuggire ad Europa e vanno a produrre un'atmosfera neutra gravitazionalmente legata a Giove. Queste specie, dopo essere state ionizzate e accelerate dal campo elettromagnetico, vengono raccolte dalla magnetosfera corotante con la luna. Non solo lo sputtering contribuisce alla popolazione atmosferica in termini di ossigeno ma fornisce ioni e specie neutre all'ambiente gioviano locale.

## (3) Radiazioni:

In generale le radiazioni, sia che riescano a penetrare in profondità o coinvolgano solo gli strati superficiali del ghiaccio d'acqua, causano dei cambiamenti. Questo fattore interessa particolarmente le componenti organiche di origine endogenica o esterna presenti sulla superficie che possono trovarsi nella struttura ghiacciata. Le radiazioni causeranno cambiamenti nella struttura delle molecole organiche ed eventualmente ne causeranno la distruzione, rendendo difficile qualunque rilevazione di natura biologica. Questo rappresenta un aspetto primario per le missioni dedicate ad Europa nel campo dell'astrobiologia e identificare regioni superficiali a bassa esposizione di radiazioni sarà fondamentale.

### **3.3 Oceano interno**

Uno dei principali obiettivi della ricerca su Europa è la determinazione dell'esistenza di un oceano sottostante alla superficie. Nel dicembre del 2014 utilizzando HST, fu acquisita un'immagine nell'ultravioletto di Europa, la quale evidenziò le emissioni di idrogeno e ossigeno nelle rispettive righe Lyman- $\alpha$  e OI a 1304 Å. Queste emissioni erano consistenti con dei "water plumes" (i.e. getti di vapor d'acqua) di altezza circa 200 km. Nelle precedenti

osservazioni nel mese di Novembre dello stesso anno e quelle condotte nel 1999 non furono rilevate queste emissioni, andando a sottolineare una attività dei getti dipendente dalla posizione orbitale attorno a Giove e quindi in accordo con il modello dello stress mareale (Roth et al. 2014).

Un'ulteriore conferma della presenza di un oceano interno deriva dal rilevamento di un campo magnetico indotto appartenente ad Europa. Un conduttore, un oceano salato in questo caso, che subisce l'effetto di un campo magnetico variabile nel tempo, sperimenterà delle correnti indotte che andranno a generare un secondo campo magnetico. Il campo di Giove essendo inclinato di circa  $10^\circ$  rispetto al suo asse di rotazione, agirà da campo magnetico variabile per i satelliti galileiani mentre lo attraversano. In questo caso un oceano interno salato produrrà il campo indotto

## **4 Missioni spaziali e prospettive future**

### **4.1 Jupiter ICy moons Explorer: JUICE**

JUICE è una missione appartenente al programma di missioni scientifiche a lungo termine, detta 'Cosmic Vision', dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), il cui lancio effettivo è avvenuto il 14 Aprile 2023 tramite il vettore Ariane 5. Questa missione fu ufficialmente scelta a Novembre 2014 e implementata nel Luglio 2015. La sonda dopo aver sfruttato l'assistenza gravitazionale della Terra, Marte e di Venere raggiungerà il sistema gioviano nel 2031.

#### **4.1.1 Obiettivi**

Il primo obiettivo di JUICE è quello di caratterizzare le condizioni e le circostanze che potrebbero aver permesso lo sviluppo di un ambiente abitabile in cui si trovano i satelliti galileiani, con particolare attenzione a Ganimede, Europa e Callisto. In particolare, la missione cercherà di caratterizzare gli strati oceanici sotterranei e le rispettive proprietà fisiche. Per quanto riguarda Europa, l'obiettivo è determinare la chimica presente ed essenziale al

sostentamento della vita, comprendere la formazione delle strutture superficiali e sondare il sottosuolo fornendo informazioni sull'oceano interno e lo spessore della crosta ghiacciata.

Il secondo obiettivo è l'esplorazione del sistema gioviano come archetipo di un gigante gassoso, con particolare attenzione all'atmosfera di Giove, alla sua magnetosfera e come questa interagisce con i satelliti. Come descritto nei capitoli precedenti, la magnetosfera e le sue componenti hanno grande influenza sui satelliti galileiani, JUICE indagherà su come l'ambiente gioviano abbia plasmato le sue lune e viceversa. A questo scopo la sonda compirà una survey del sistema gioviano della durata di 3 anni, compiendo 67 orbite a diverse inclinazioni e periodi, 35 sorvoli divisi tra Europa (2), Ganimede (12) e Callisto (21).

Nella seconda parte della missione JUICE spenderà ulteriori nove mesi orbitando attorno a Ganimede per una analisi molto approfondita delle sue proprietà superficiali e habitat per la vita. A causa dell'ampio spettro di indagine che la sonda dovrà portare avanti nel suo periodo di attività, che potrebbe essere anche esteso in seguito, lo sviluppo del piano di osservazione dovrà tenere conto della possibilità di un conflitto tra le opportunità osservative. (Vallat et al., 2022)

#### **4.1.2 Strumentazione**

Per poter portare avanti la ricerca scientifica, JUICE possiede una strumentazione molto avanzata e che copre l'ampio spettro di investigazione a cui è destinata. La sonda è stata dotata di dieci strumenti, più uno sperimentale che sfrutta il sistema di telecomunicazione della sonda con sistemi terrestri. Di seguito si riportano gli strumenti di JUICE, come riportato in figura 12:

- i. JANUS: camera ottica con 1.3 gradi di campo di vista e una risoluzione di 2.4 metri per pixel. JANUS è dedicata allo studio della morfologia e dei processi superficiali delle lune dal livello locale a quello globale e per mappare l'atmosfera di Giove.
- ii. Moons and Jupiter Imaging Spectrometer (MAJIS): spettrometro con un range di lunghezza d'onda compreso tra 0.4 e 5.7  $\mu\text{m}$  e una risoluzione spettrale compresa tra 3 e 7 nm. MAJIS si occuperà di caratterizzare le componenti ghiacciate e i minerali presenti sulla

superficie delle lune. In aggiunta, essendo immerso nell'ambiente gioviano, ne studierà atmosfera e struttura termica.

- iii. UV imaging Spectrograph (UVS): uno spettrometro specifico per il range dell'ultravioletto, che coprirà le lunghezze d'onda comprese tra 550 e 2100 Å. UVS studierà la composizione e la dinamica delle esosfere delle lune, le aurore di Giove e gli strati alti della sua atmosfera.
- iv. Sub-millimeter Wave Instrument (SWI): SWI investigherà la dinamica, la composizione e la struttura in relazione alla temperatura della stratosfera e della troposfera di Giove, per poi concentrarsi sulle esosfere e superfici delle lune ghiacciate. Questo strumento opererà in due range di frequenze, uno compreso tra 1080 e 1275 GHz e uno compreso tra 530 e 601 GHz.
- v. GAnymede Laser Altimeter (GALA): un altimetro laser che verrà impiegato per studiare le deformazioni mareali di Ganimede, oltre alla morfologia e topografia delle superfici delle lune.
- vi. Radar for Icy Moon Exploration (RIME): un radar studiato per penetrare il ghiaccio che studierà la struttura sotto-superficiale delle lune ghiacciate fino a una profondità di 9 km. RIME opererà a una frequenza centrale di 9 MHz.
- vii. A magnetometer instrument for JUICE (J-MAG): un magnetometro destinato allo studio del campo magnetico di Giove e le sue interazioni sia con il campo magnetico di Ganimede, sia con l'oceano interno di Europa
- viii. Particle Environment Package (PEP): questo strumento si occuperà di caratterizzare il plasma nell'ambiente gioviano, misurando la densità e i flussi di ioni positivi e negativi, elettroni, gas neutro plasma termico ed atomi neutri energetici in un range di energia inferiore a 0.001 eV e maggiore di 1 MeV.

- ix. Radio & Plasma Wave Investigation (RPWI): questo strumento cercherà di caratterizzare le emissioni radio di Giove e il plasma nel suo ambiente.
  
- x. Gravity & Geophysics of Jupiter and Galilean Moons (3GM): 3GM sarà impiegato nello studio del campo gravitazionale nelle vicinanze di Ganimede e l'estensione degli oceani interni delle lune ghiacciate. Inoltre, investigherà la struttura dell'atmosfera neutra e della ionosfera di Giove e dei satelliti galileiani.
  
- xi. Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment (PRIDE): PRIDE utilizzerà il sistema di telecomunicazione di JUICE e il Very Long Baseline Interferometry (VLBI) per fornire misure accurate sulla posizione e sulla velocità della sonda per studiare il campo gravitazionale di Giove e delle lune.

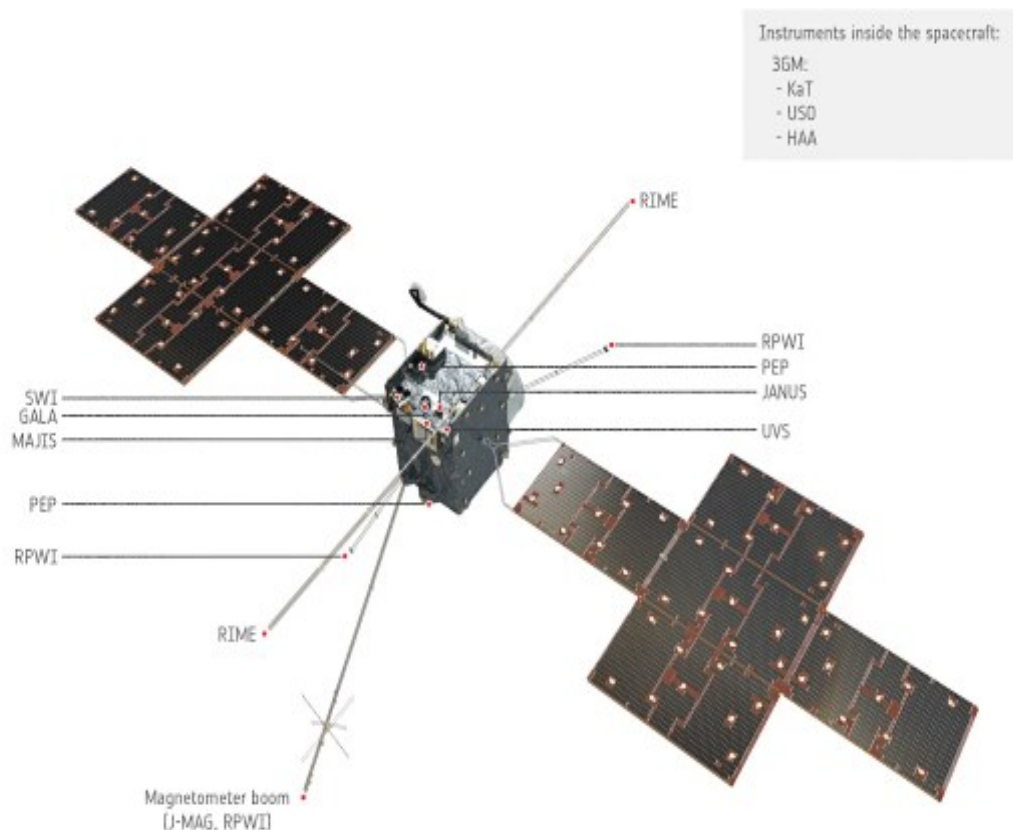


Fig. 12 Strumenti a bordo della sonda spaziale JUICE. Credit to: ESA/ATG medialab

Una volta giunta al termine della sua missione, stimato nel settembre del 2035, JUICE verrà fatta scendere verso Ganimede fornendo ulteriori dati finali durante l'avvicinamento alla superficie.

## **4.2 Europa Clipper Mission**

Europa Clipper (si veda figura 8) è una missione interplanetaria in fase di sviluppo della NASA. A differenza di JUICE, che studierà anche il sistema gioviano oltre alle lune ghiacciate, Clipper andrà ad investigare specificatamente Europa, cercando di caratterizzarne l'abitabilità e identificare un possibile sito di atterraggio per un lander. Tuttavia, a causa del forte campo di radiazioni in cui si trova Europa, la sonda non potrà orbitarci direttamente attorno poiché questo danneggerebbe gli strumenti prima che possano trasmettere dati e misurazioni e soprattutto i pannelli solari che alimentano la sonda. In seguito a queste considerazioni, Europa Clipper orbiterà direttamente attorno a Giove conducendo 45 sorvoli di Europa a varia distanza tra i 25 km e i 2700 km.

Il lancio della sonda è programmato per il mese di Ottobre 2024 e dovrebbe raggiungere il sistema gioviano in sovrapposizione a JUICE, intorno ad Aprile 2030. Questa esplorazione condivisa da parte di entrambe le sonde richiederà una stretta collaborazione tra i gruppi responsabili delle rispettive missioni ma rappresenterà una grande occasione per condividere i dati acquisiti, pubblicazioni e osservazioni.

### **4.2.1 Obiettivi**

Lo scopo principale di Europa Clipper, illustrata in figura 13, come citato nel paragrafo precedente, è quello di verificare l'abitabilità di Europa e questo sarà possibile attraverso la realizzazione di tre obiettivi:

- i. Caratterizzare la struttura ghiacciata della crosta e investigare l’oceano sottostante, studiandone le proprietà e le interazioni con la crosta ghiacciata.
- ii. Definire l’abitabilità dell’oceano sottostante, investigandone la composizione e la chimica
- iii. Studiare il meccanismo di formazione delle strutture superficiali recenti o antiche e identificare siti per futuri analisi *in situ*

Al momento la sonda si trova nella fase di ‘Assembly, Test and Launch Operations’ (ATLO) presso il Jet Propulsion Laboratory (JPL) della NASA. Durante questa fase le componenti verranno assemblate e testate per poter essere montate sulla sonda. Una volta completata questa prima fase di ATLO, si passerà ai test di sistema della sonda assemblata.

Successivamente, dopo aver superato i test di resistenza della fase numero quattro, nella quale verranno riprodotti gli ambienti spaziali che Europa Clipper affronterà, si passerà ai controlli finali per poterla spedire al sito di lancio ‘Kennedy Space Center’ e poi procedere con la partenza della missione nel mese di ottobre del 2024 (Pappalardo et al., 2022).

#### **4.2.2 Strumentazione**

Tutti questi obiettivi saranno portati a termine utilizzando un complesso di nove strumenti che si occuperanno sia di analisi da remoto che *in situ*.

- i. Europa-Thermal Emission Imaging (E-THEMIS): questo strumento opererà nel range dell’infrarosso per poter rilevare regioni più calde dove l’acqua liquida potrebbe trovarsi al di sotto della superficie.



- ii. Mapping Imaging Spectrometer for Europa (MISE): questo spettrometro nell'infrarosso mapperà la distribuzione di ghiaccio, sali, specie organiche e le zone più calde.
  
- iii. Europa Imaging System (EIS): EIS è compost da due fotocamere nel range del visibile, una ad angolo ampio (WAC) e una ad angolo stretto (NAC) che serviranno a mappare la maggior parte della superficie di Europa con una risoluzione fino a 50 metri.
  
- iv. Europa Ultraviolet spectrograph (Europa-UVS): questo spettrografo nell'ultravioletto aiuterà a determinare la composizione dell'atmosfera e della superficie, inoltre cercherà tracce di 'plumes'.
  
- v. Radar for Europa Assessment and Sounding: Ocean to Near-Surface (REASON): un radar che analizzerà la struttura ghiacciata della crosta, le sue formazioni superficiali e gli strati sottostanti per rilevare la presenza di acqua liquida.
  
- vi. Europa Clipper Magnetometer (ECM): caratterizzerà il campo magnetico attorno ad Europa, permettendo di determinare la presenza dell'oceano salato interno, oltre a stimare lo spessore della crosta ghiacciata, la profondità e la salinità dell'acqua sottostante.
  
- vii. Plasma Instrument for Magnetic Sounding (PIMS): la ionosfera di Europa e la magnetosfera di Giove distorcono i campi magnetici vicini alla luna, PIMS riuscirà a distinguere l'effetto di queste interferenze per poter valutare solo il contributo del campo magnetico indotto, che contiene informazioni sull'oceano interno.

- viii. Mass SPECTrometer for Planetary EXploration (MASPEX): lo spettrometro di massa analizzerà il gas presente nella tenue atmosfera di Europa ed eventualmente espulso dalla superficie. Questo permetterà di studiare la composizione della superficie e dell'oceano sottostante.
  
- ix. Surface Dust Mass Analyzer (SUDA): questo strumento permetterà di analizzare le particelle espulse dalla superficie o appartenenti ai plumes, campionandole direttamente durante dei sorvoli a bassa quota. SUDA sarà anche in grado di identificare materiali organici e inorganici presenti nel materiale espulso.

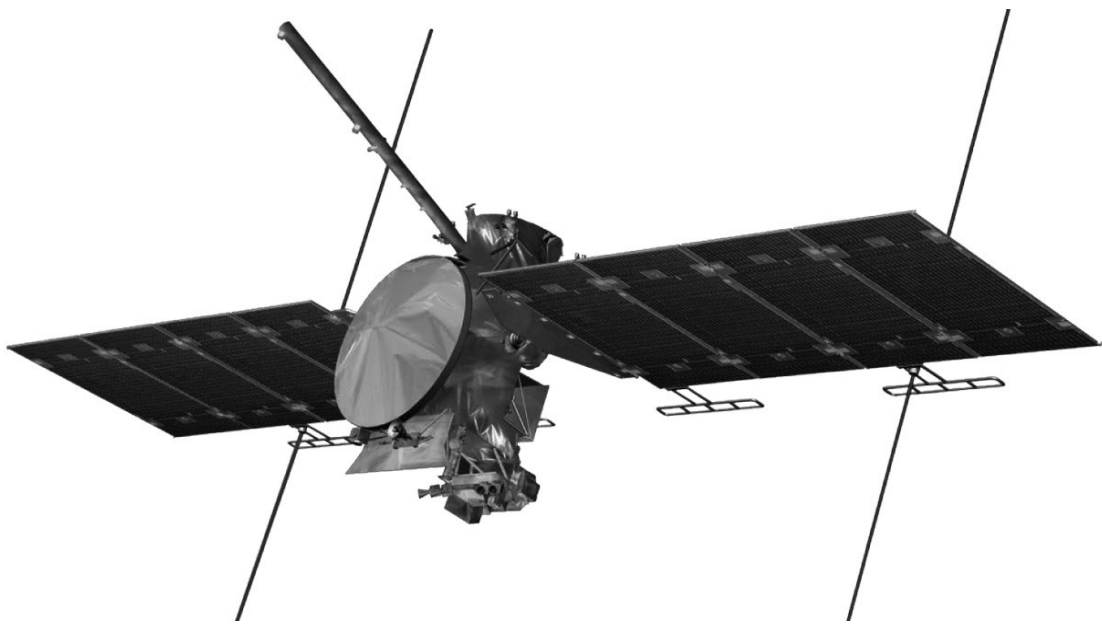


Fig. 13 Illustrazione digitale della sonda Europa Clipper. Credit to: NASA/JPL-Caltech

## **5 Conclusione**

Per concludere, Europa incarna un ottimo esempio di promettente realtà per l'indagine astrofisica e astrobiologica, cioè quella delle lune ghiacciate. Il complesso sistema di lune ghiacciate attorno ad un gigante gassoso come Giove potrebbe essere caratterizzato come possibile sistema abitabile, espandendo la frontiera della ricerca in questo campo. Il risultato delle due missioni, descritte in questo elaborato, rappresenterà un sorprendente punto di arrivo per l'esplorazione spaziale e al contempo un punto di partenza rivoluzionario per le indagini future, raccogliendo il testimone da missioni precedenti e a loro volta fondamentali. JUICE e Clipper consentiranno all'uomo di fare un importante passo in avanti nella ricerca della vita oltre il nostro pianeta.

## Riferimenti bibliografici:

- W. B. Sparks et al., (2016) Probing for evidence of plumes on Europa with HST/STIS, ApJ 829, 121
- Donald Savage, Jones, Tammy; Villard, Ray (1995) “Hubble Finds Oxygen Atmosphere on Europa”, Project Galileo, NASA, Jet Propulsion Laboratory.
- Wesley Petterson, Head, James W.; Collins, Geoffrey C. et al., (2007) A Global Geologic Map of Ganymede ,in Lunar and Planetary Science, vol. 38, p. 1098.
- M.G. Kivelson, Khurana, K.K.; Coroniti, F.V. et al., (2002) The Permanent and Inductive Magnetic Moments of Ganymede, vol. 157, pp. 507-522.
- C. Zimmer, Khurana, K. K. e Margaret G. Kivelson, (2000) Subsurface Oceans on Europa and Callisto: Constraints from Galileo Magnetometer Observations, vol. 147, n. 2, pp. 329–347.
- J. D. Anderson, Jacobson, R. A., McElrath, T. P., et al., (2001) G. Schubert e P. C. Thomas, Shape, mean radius, gravity field and interior structure of Callisto, in Icarus, vol. 153, n. 1, pp. 157–161.
- O.L. Kuskov e Kronrod, (2005) V.A., *Internal structure of Europa and Callisto*, vol. 177, n. 2, pp. 550–369.
- Hall D. T., Strobel D. F., Feldman P. D., McGrath M. A., and Weaver H. A. (1995) Detection of an oxygen atmosphere on Jupiter’s moon Europa. Nature, 373, pp. 677–679. In McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). Observations of Europa's Tenuous Atmosphere.
- Hall D. T., Feldman P. D., McGrath M. A., and Strobel D. F. (1998) The far-ultraviolet oxygen airglow of Europa and Ganymede. Astrophys. J., 499, pp. 475–481. In McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, JSTOR, pp. 485-505.
- McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, JSTOR, pp. 485-505.
- Kivelson M. G., Khurana K. K., Coroniti F. V., Joy S., Russell C. T., Walker R. J., Warnecke J., Bennett L., and Polanskey C. (1997) Magnetic field and magnetosphere of Ganymede. Geo-phys. Res. Lett., 24, 2155. In McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). Observations of Europa's Tenuous Atmosphere, JSTOR, pp. 485-505.

- Mauk B. H., Mitchell D. G., Krimigis S. M., Roelof E. C., and Paranicas C. P. (2003) Energetic neutral atoms from a transEuropa gas torus at Jupiter. *Nature*, 421, 920–922.
- Kliore A. J., Hinson D. P., Flasar F. M., Nagy A. F., and Cravens T. E. (1997) The ionosphere of Europa from Galileo radio occultations. *Science*, 277, 355–358.
- Kliore A. J., Anabtawi A., and Nagy A. F. (2001) The ionospheres of Europa, Ganymede, and Callisto. *Eos Trans. AGU*, 82(47), Fall Meet. Suppl., Abstract. In McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). *Observations of Europa's Tenuous Atmosphere*, JSTOR, pp. 485-505.
- Kliore A. J., Nagy A. F., Flasar F. M., Schinder P. J., and Hinson D. P. (2006) Radio science data on the ionospheres of Jupiter, Saturn, and their major satellites. 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, Abstract. In McGrath, M. & Hansen, C. & Hendrix, A. & Retherford, Kurt. (2009). *Observations of Europa's Tenuous Atmosphere*, JSTOR, pp. 485-505.
- Johnson R. E., Carlson R. W., Cooper J. F., Paranicas C., Moore M. H., and Wong M. C. (2004) Radiation effects on the surfaces of the Galilean satellites. In *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere* (F. Bagenal et al., eds.), Cambridge Univ., Cambridge, pp. 485–512.
- Brown M. E. and Hill R. E. (1996) Discovery of an extended sodium atmosphere around Europa. *Nature*, 380, 229–231.
- Cooper J. F., Johnson R. E., Mauk B. H., Garrett H. B., and Gehrels N. (2001) Energetic ion and electron irradiation of the icy Galilean satellites. *Icarus*, 149, pp. 133–159.
- Roth L., Saur J., Retherford D. K., Strobel D. F., Feldman P. D., McGrath M. A., and Nimmo F., (2014) Transient Water Vapor at Europa's South Pole. *Science* 343, pp. 171-174.
- Nimmo, F., and R. T. Pappalardo (2016), Ocean worlds in the outer solarsystem, *J. Geophys. Res. Planets*, 121, 1378–1399.
- Vallat. C., Altobelli N., Lorente R., Munoz C., Witasse O., Cavalié T., Fletcher L., Masters A., Modolo R., Roatsch T., Tobie G., Tosi F. and Van Hools T. (2022) The Science Planning Process for the JUICE mission, Europlanet Science Congress 2022, Granada, Spagna, 18-23 September 2022.
- Pappalardo, R., Buratti, B., Korth, H., Craft, K., Daubar, I., Howell, S., Klima, R., Phillips, C., Leonard, E., Lesage, E., Novak, A. M., & Team, E. C. S. (2022). Europa Clipper: A Mission to Explore Europa's, Habitability. *Bulletin of the AAS*, 54(8).

**Sitografia:**

- <https://sci.esa.int/web/juice/-/50073-science-payload>
- <https://europa.nasa.gov/spacecraft/instruments/>