

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

Tesi di Laurea

Il rapporto isotopico D/H nelle comete attraverso il telescopio stratosferico SOFIA

Relatrice

Prof.ssa Monica LAZZARIN

Correlatrice

Dott.ssa Fiorangela LA FORGIA

Laureanda

Alessandra MURA

Anno Accademico 2020/2021

Indice

Abstract	5
1 Le comete	7
1.1 Classificazione	8
1.2 Fenomenologia	9
1.3 Composizione	10
1.4 Spettri cometari	12
2 Il rapporto D/H	17
2.1 Frazionamento isotopico	17
2.2 L'importanza dell'acqua	18
2.3 L'acqua terrestre	19
2.4 Metodi di misura	20
2.5 Il D/H nelle comete	22
2.6 L'iperattività	25
3 La missione SOFIA	29
3.1 Obiettivi e punti di forza	29
3.2 Caratteristiche strumentali	31
3.3 Possibilità osservative di GREAT	33
4 Proposal osservativo	37
4.1 Razionale scientifico	38
4.2 Selezione dei target	39
4.3 Strategia osservativa	42

Conclusioni**45****Bibliografia****47**

Abstract

Il presente lavoro di tesi è incentrato sullo studio delle comete attraverso il rapporto isotopico D/H e si propone di approfondirne gli aspetti teorici e pratici, dalle metodologie di misura al collegamento tra acqua cometaria e terrestre. Dopo un primo capitolo introduttivo in cui verranno discusse le principali caratteristiche fisiche e osservative delle comete, il secondo capitolo tratterà in maniera approfondita il significato del D/H; quale sia la causa della varietà di valori che questo parametro assume nel sistema solare e cosa ne consegua, quali ipotesi permetta di fare riguardo l'origine dell'acqua sulla Terra e in che modo la sua misura permetta di ampliare la conoscenza della struttura dei nuclei cometari.

Gli ultimi due capitoli assumono invece una finalità applicativa. Verrà descritto il telescopio stratosferico SOFIA (*Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy*) di cui saranno discussi i punti di forza per quanto concerne l'osservazione delle comete rispetto ai siti terrestri e in conclusione verrà prodotto un proposal osservativo al fine di misurare il rapporto D/H in due comete dinamicamente nuove, C/2021 A1 (Leonard) e C/2021 O3 (PANSTARRS).

Capitolo 1

Le comete

Le comete sono piccoli corpi ghiacciati che popolano le zone più esterne del sistema solare, la fascia di Kuiper ($30 - 50 \text{ UA}^1$) e la nube di Oort ($10^4 - 10^5 \text{ UA}$). Questi oggetti celesti conservano i ghiacci più primitivi e incontaminati formatisi nella nebulosa presolare; per questo motivo sono da sempre alcuni degli obiettivi più studiati dagli astronomi per ricostruire la storia del sistema solare. Si ritiene che i nuclei delle comete si siano formati dall'accrescimento di grani di polvere presolari presenti nella nube molecolare originale e che, dopo il riprocessamento termico dovuto alla radiazione della propria stella, abbiano subito un accrescimento della loro massa e si siano stabiliti nelle fredde regioni esterne (Lis et al. 2019 [54]; Boogert et al. 2015 [12]). Il motivo dell'ubicazione dei nuclei cometari nel sistema solare è tuttora dibattuto: secondo alcuni modelli, questi corpi si sono formati in posizioni più interne e sono stati successivamente spinti verso l'esterno dalla migrazione dei pianeti gassosi, che hanno interferito marealmente con le loro orbite (Dones et al. 2000 [26]). Altri studi invece sostengono che la nube di Oort si sia formata quasi esclusivamente strappando materia alle nebulose primordiali di altre stelle, o raccogliendo detriti vaganti nella nube molecolare originale (Levison et al. 2010 [52]). Ad oggi si ritiene che tutti questi fenomeni abbiano contribuito in qualche misura alla formazione della nube di Oort (Zwart et al. 2021 [86]).

¹Unità Astronomiche. $1 \text{ UA} = 149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$



Figura 1.1: Immagine della cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) ottenuta con un teleobiettivo il 14 marzo 1997. Si possono distinguere la coda di ioni e la coda di polveri.

Fonte: <https://www.eso.org>

1.1 Classificazione

Data la natura sorprendente della loro manifestazione, le comete sono state studiate fin dall'antichità, i loro passaggi segnati e i loro parametri orbitali accuratamente calcolati. Confrontando queste misure si sono notate delle caratteristiche ricorrenti, sulla base delle quali vennero distinti due gruppi principali:

- Comete a lungo periodo:

In questa categoria rientrano le comete con periodo orbitale superiore a 200 anni. Sono originarie della nube di Oort (si dicono OCC, *Oort Cloud Comet*), dove risiedono inerti su orbite estremamente isotrope a migliaia di UA dal Sole. In seguito a perturbazioni dinamiche dovute tipicamente al passaggio ravvicinato di una stella, possono essere deviate verso le regioni più interne del sistema solare e si inseriscono su orbite chiuse (ellittiche) o aperte (paraboliche o iperboliche). Nel primo caso la cometa tornerà

periodicamente vicino alla Terra, nel secondo caso si allontanerà indefinitamente dal sistema solare dopo il primo passaggio.

- Comete a corto periodo:

Per periodi orbitali inferiori ai 200 anni si hanno invece comete a corto periodo. Le loro basse inclinazioni rispetto all'eclittica suggeriscono un'origine diversa rispetto alle OCC; la fascia di Edgeworth-Kuiper fu teorizzata proprio per spiegarne le caratteristiche. Rispetto alla nube di Oort, per la quale si suppone una distribuzione sferica infatti, la fascia di Kuiper è meglio rappresentata da un disco di rocce e polveri che circonda il Sole. In questo gruppo si possono distinguere le comete di tipo Halley e le comete gioviane (JFC, *Jupiter Family Comet*). Le prime hanno periodi orbitali superiori a 20 anni e hanno un afelio molto distante dal Sole, che può raggiungere i confini del sistema solare. Le JFC invece vengono costrette su orbite più interne con periodi inferiori a 20 anni, in seguito ad un'interazione gravitazionale con Giove.

1.2 Fenomenologia

I nuclei inerti delle comete hanno dimensioni ridotte, dai 100 m ai 10 km e sono particolarmente difficili da avvistare da terra, a causa della loro bassa luminosità. Quando il nucleo si trova in prossimità del Sole si attiva e acquisisce una serie di nuove componenti che ne permettono l'individuazione anche ad occhio nudo:

- Chioma:

Questa struttura tipicamente di forma sferica può essere considerata l'atmosfera della cometa e raggiunge dimensioni tipiche di $10^7 - 10^8$ m. La chioma si genera in seguito alla sublimazione dei ghiacci contenuti nel nucleo, stimolata dalla radiazione solare incidente. La pressione del gas così formato accelera le polveri superficiali che sfuggono alla gravità del nucleo e rimangono in sospensione nella chioma. I raggi solari inoltre causano la fotodissociazione di varie molecole che rilasciano radicali neutri nella chioma. La molecola più abbondante è l'acqua, che si fotodissocia secondo la reazione $H_2O + \gamma \rightarrow H + OH$ rilasciando i radicali neutri H e OH . Queste specie hanno emissioni ben visibili nell'ultravioletto, rispettivamente a 1215.67 Å e 3085 Å (Mayyasi et al. 2020 [57]; Hyland et al. 2019 [43]).

- Coda di polveri:

La pressione di radiazione dei raggi solari esercitata sulle polveri ne causa l'espulsione dalla chioma, formando una struttura allungata detta coda, che raggiunge i 10^{10} m di lunghezza. Tipicamente risulta di un colore bianco/giallo dato dalla riflessione della luce solare da parte delle polveri. Si estende in verso opposto al Sole e presenta una curvatura causata dal moto orbitale della cometa.

- Coda di ioni:

Le molecole della coda con energie di ionizzazione più basse perdono i loro elettroni in seguito all'irraggiamento, formando la coda di ioni o di plasma. Punta sempre nel verso opposto al Sole, spinta dall'interazione con le particelle cariche del vento solare e ha un tipico colore blu dovuto alla fluorescenza del gas ionizzato.

In Figura 1.1 viene mostrata la cometa Hale-Bopp durante il suo passaggio vicino alla Terra nel 1997: si possono notare distintamente le due code, mentre il nucleo non è visibile. Invece in Figura 1.2 è riportato uno schema che illustra un nucleo cometario attivo.

Dopo svariati passaggi al perielio la cometa può esaurire gli elementi volatili del nucleo e continuare a vagare estinta per il sistema solare, indistinguibile da un asteroide. Oppure, prima che ciò avvenga, potrebbe collidere con un pianeta, scindersi in nuclei più piccoli, o formare un mantello roccioso refrattario che impedisce un'ulteriore sublimazione degli elementi volatili (cometa addormentata). Infine il nucleo può essere disintegrato dalla gravità o dal calore del Sole.

1.3 Composizione

Le comete sono composte principalmente da ghiaccio, polvere e roccia. Uno dei primi modelli di composizione del nucleo fu quello di Whipple delle *dirty snowball* ossia sfere di ghiaccio sporche di polvere. Dall'analisi dei dati riportati dalla missione Giotto nel 1986 sulla cometa Halley, seguì una modifica della teoria di Whipple: si osservò che la componente principale non era il ghiaccio, ma le polveri (Reinhard, 1986 [67]). Inoltre grazie alla successiva missione Rosetta, che nel 2014 fece atterrare con successo un piccolo *lander* (Philae) sulla superficie della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P), si poté delineare un modello ancora più dettagliato. I nuclei cometari sono porosi, di bassa densità, spesso composti da subunità fuse insieme in seguito a scontri a basse velocità. Non tutta la superficie emette attivamente gas e polveri, infatti le loro dimensioni sono spesso più grandi rispetto

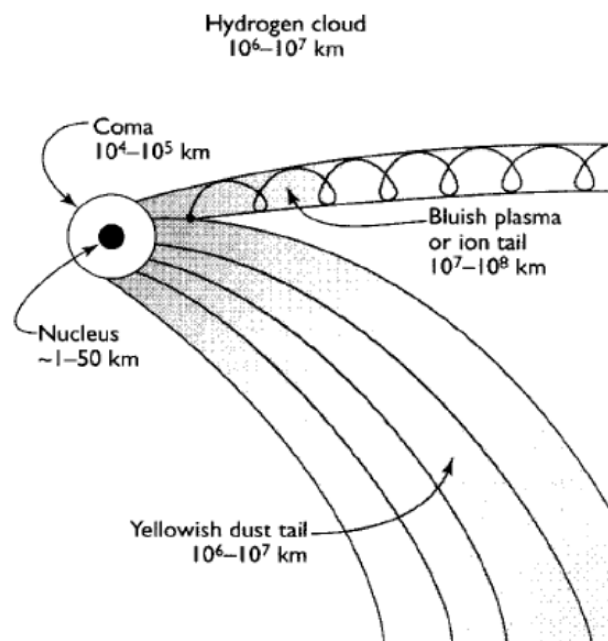


Figura 1.2: Modello schematico di nucleo cometario attivo. Fonte: [50]

a quanto si potrebbe dedurre dai loro tassi di produzione di elementi volatili. (Sierks et al. 2015 [74]; Massironi et al. 2015 [56]).

Nella fase dormiente, il nucleo è principalmente composto da molecole di acqua H_2O , monossido di carbonio CO , biossido di carbonio CO_2 , ammoniaca NH_3 , metano CH_4 , cianuro di idrogeno HCN e cianogeno C_2N_2 in forma ghiacciata, mentre le polveri sono generalmente metalli, silicati, ossidi, carbonati, solfuri e composti inorganici complessi come l'olivina, la ferrosilite e il pirosseno (Greenberg & Li, 1999 [37]; Cochran, Barker & Gray, 2011 [19]). Nelle fasce di oggetti ai confini del sistema solare, i nuclei sono continuamente esposti alla radiazione ionica solare che crea una crosta superficiale detta *mantello di irraggiamento*; i legami intermolecolari dei composti vengono alterati e si genera materia organica refrattaria, ad esempio metanolo, formaldeide, etanolo ed etano. Questo avviene quando i ghiacci esposti liberano idrogeno e formano legami col carbonio, del tipo $C - C$, $C - N$, $C - O$, $C - S$ ². Le molecole di acqua, ammoniaca e metano si spezzano generando radicali altamente reattivi che contribuiscono alla formazione di nuove specie più complesse. Quando

²Milani, A., di Martino, M., Cellino, A.; *Asteroids, comets, meteors 1993: proceedings of the 160th Symposium of the International Astronomical Union, held in Belgirate, Italy, June 14-18, 1993*, cap. 3, pag. 37 [58]

la cometa entra nel sistema solare interno perde questo mantello e inizia ad intravedersi la chioma, nella quale sono state rilevate, oltre alle molecole gassose già individuate nel nucleo, anche radicali molto reattivi, come C_2 , CN , CH , NH e OH (Hyland et al. 2019 [43]; Cochran, Barker & Gray, 2011 [19]). Alle lunghezze d'onda del visibile (3000 – 8000 Å) domina lo spettro la riga di emissione del CN a 3880 Å. La presenza di questi radicali liberi implica che la densità della chioma debba assumere valori molto bassi.

La reazione di fotodissociazione (o fotolisi) è il motivo per cui nella chioma si individuano elementi diversi rispetto al nucleo. In questo processo, una molecola più o meno complessa (specie genitrice) viene distrutta dalla radiazione ultravioletta solare in composti più semplici (specie figlie) o, talvolta, ulteriormente scomposta nei suoi singoli elementi (Feldman, Cochran & Combi, 2004 [31]).

Essendo le comete, insieme agli altri corpi minori, i primi oggetti ad essersi formati nella nebulosa protosolare, lo studio della loro composizione è fondamentale per determinare le caratteristiche del sistema solare primordiale.

1.4 Spettri cometari

La composizione di una cometa viene dedotta principalmente per via spettroscopica. Nello spettro si distinguono tre contributi: le emissioni molecolari del gas, dovute generalmente a transizioni di fluorescenza delle specie chimiche, il continuo solare riflesso dalla polvere e le linee telluriche, che derivano dall'interazione con l'atmosfera terrestre. Modellare e sottrarre correttamente il continuo e le righe telluriche è fondamentale per l'interpretazione delle righe spettrali dovute alle emissioni dei gas (Cochran et al. 2020 [20]). In Figura 1.4 si possono osservare due esempi di spettri cometari rilevati nella regione dell'infrarosso (*a*) e dell'ultravioletto (*b*), in cui sono visibili le righe di diversi atomi, ioni e molecole. In particolare la figura (*a*) mostra sia il modello del continuo, che andrà sottratto, sia i modelli delle righe di emissione di ciascun elemento.

Le righe di emissione che si osservano negli spettri vengono generate per eccitazione collisionale o radiativa. Le collisioni si considerano trascurabili, date le basse densità riscontrate nelle chiome (paragrafo 1.3). I processi radiativi sono i più frequenti e possono causare transizioni elettroniche, vibrazionali e/o rotazionali, visibili rispettivamente in ultravioletto, infrarosso e microonde. Le transizioni elettroniche sono le più rare, dal momento che l'interazione con i fotoni UV del Sole causa con più probabilità la scissione della molecola, piuttosto che l'assorbimento. Le transizioni rotazionali e vibrazionali invece vengono in-

dividuate grazie ad un processo di assorbimento e conseguente emissione spontanea, detto risonanza di fluorescenza (Bockelée-Morvan et al. 2004 [9]).

Col diminuire della distanza eliocentrica R_h si intravedono sempre più righe nello spettro visibile (Feldman, Cochran & Combi, 2004 [31]):

- $R_h = 3$ UA: emissioni del CN (3880Å, 7873Å)
- $2 < R_h < 3$ UA emissioni C_3 (3440 – 4100Å), NH_2 (4500 – 7350Å) e H_2O (4270 – 7540Å)
- $R_h = 1.5$ UA emissioni C_2 (bande Swan, Phillips e Mulliken, rispettivamente 5165Å, 7715Å, 2313Å), OH (3085Å), NH (3360Å), CH (4314Å, 3871, 3889Å)
- $R_h = 1$ UA righe OI (6300, 6364Å, 5577Å) e doppietto del Na (5890, 5896Å)

Il presentarsi di queste righe dipende non solo dall’effettivo calore del Sole, ma anche dall’abbondanza dei vari composti: specie presenti in quantità inferiori, necessiteranno di un’esposizione maggiore alla radiazione solare affinché le transizioni di fluorescenza risultino osservabili. Alcune comete con distanze del perielio < 0.02 UA presentano righe di elementi metallici nei loro spettri; questo avviene perché a tali distanze dal Sole la radiazione è abbastanza forte da innescare la sublimazione anche della polvere refrattaria.

Ricavare lo spettro di una cometa permette di ottenere svariate importanti informazioni. Ad esempio, il confronto tra le righe osservate e i modelli di emissione permette di delineare il profilo delle righe, da cui si ricavano la densità di colonna, i tassi di produzione Q degli elementi e le loro abbondanze. Le bande dell’ H_2O possono essere utilizzate per dedurre il tasso di produzione dell’acqua nella chioma; tuttavia, dal momento che ricadono nella zona di assorbimento dell’atmosfera, è spesso preferito il doppietto dell’ OH a 18cm che rientra nella finestra radio osservabile da terra (Hyland et al. 2019 [43]). Una volta modellati i profili di emissione di ciascuna specie si può ottenere un confronto tra i picchi appartenenti ad elementi diversi, oppure ad isotopi del medesimo elemento. Nel primo caso i rapporti relativi³ contribuiscono ad identificare una determinata classe di comete, dette *depleted* che presentano tassi di produzione di C_2 o C_3 inferiori rispetto alle comete normali. Questa riduzione di elementi volatili può fornire indizi sull’omogeneità delle regioni

³tipicamente la specie interessata viene confrontata con le righe più intense, quindi OH e CN .

di formazione, oppure, se tutte le emissioni risultano meno intense, sui fenomeni evolutivi a cui sono soggetti i nuclei attivati (Cochran et al. 2020 [20]). In Figura 1.3 si possono osservare a confronto le emissioni di una cometa classica (8P/Tuttle (8P), in basso) con quelle di una cometa *depleted* (21P/Giacobini-Zinner (21P), in alto). L'emissione del *CN* risulta ben visibile in entrambi i casi, mentre le altre specie sono appena rilevabili nello spettro di 21P. Confrontando le abbondanze relative al *CN* in entrambi i corpi, si risale all'entità dell'impoverimento (*depletion*). In base alla definizione di Cochran, Barker e Gray (2011 [19]) si definiscono *depleted* le comete per cui si misurano abbondanze relative pari a $\log[Q(C_3)/Q(CN)] \leq -0.86$ e $\log[Q(C_2)/Q(CN)] \leq 0.02$.

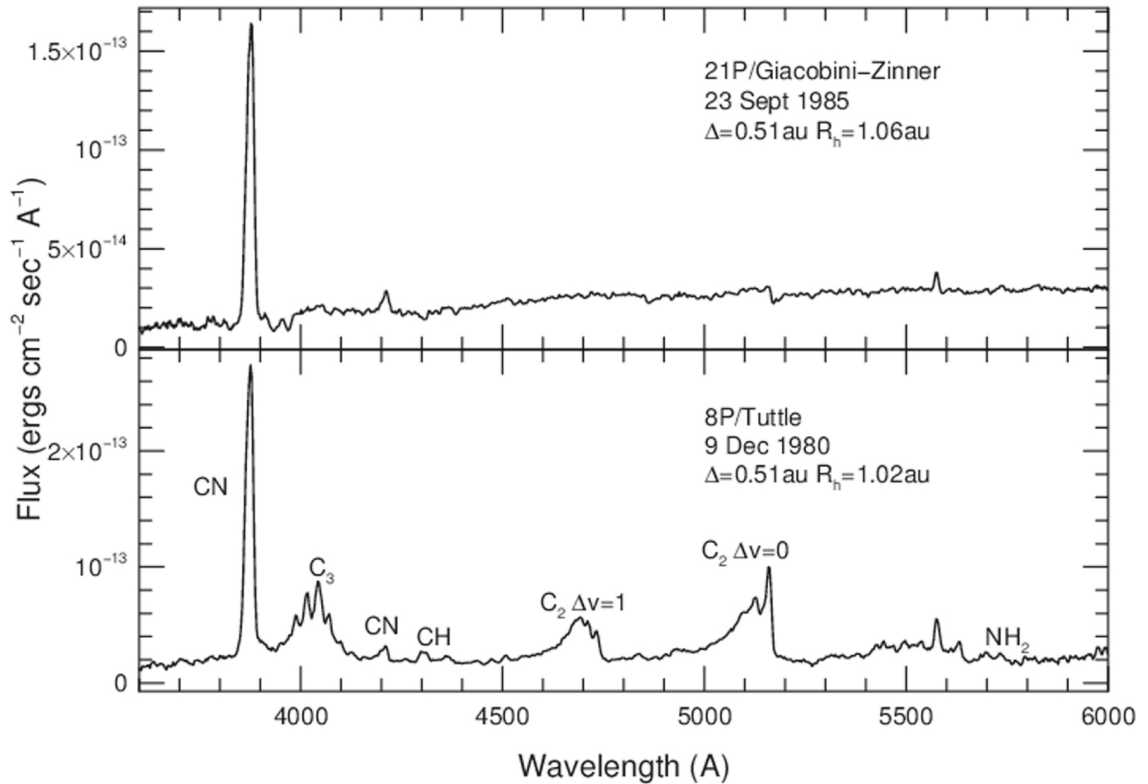


Figura 1.3: Esempio di *depletion* nelle comete. In alto è riportato lo spettro della cometa 21P/Giacobini-Zinner, a confronto con quello della cometa 8P/Tuttle in basso. Sono evidenti le differenze nei picchi di emissione. Fonte: Cochran et al. 2020 [20]

Gli spettri ad alta risoluzione delle comete permettono di ricavare inoltre alcuni rapporti

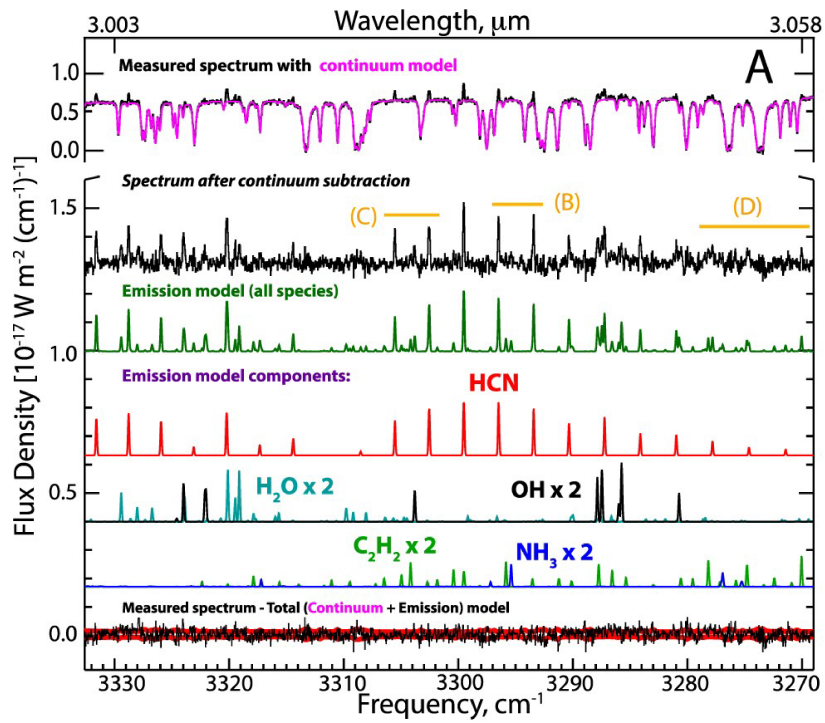
isotopici dello stesso elemento. Tali rapporti⁴ permettono di risalire alla composizione e alle caratteristiche originarie del sistema solare. Il D/H in particolare rappresenta un collegamento diretto con le condizioni della nube molecolare in cui si è formato il Sole (Capitolo 2).

Nella regione infrarossa e submillimetrica si possono osservare le bande vibrazionali di diverse molecole, tra cui acetilene (C_2H_2), etano (C_2H_6), cianuro di idrogeno (HCN), ammoniaca (NH_3), formaldeide (H_2CO), metanolo (CH_3OH) e acqua (H_2O). Queste specie sono fondamentali per il calcolo dell'abbondanza isotopica di carbonio, ossigeno e idrogeno. In particolare verranno discusse nel Capitolo 2 le transizioni nel submillimetrico di H_2O e HDO per determinare il rapporto D/H .

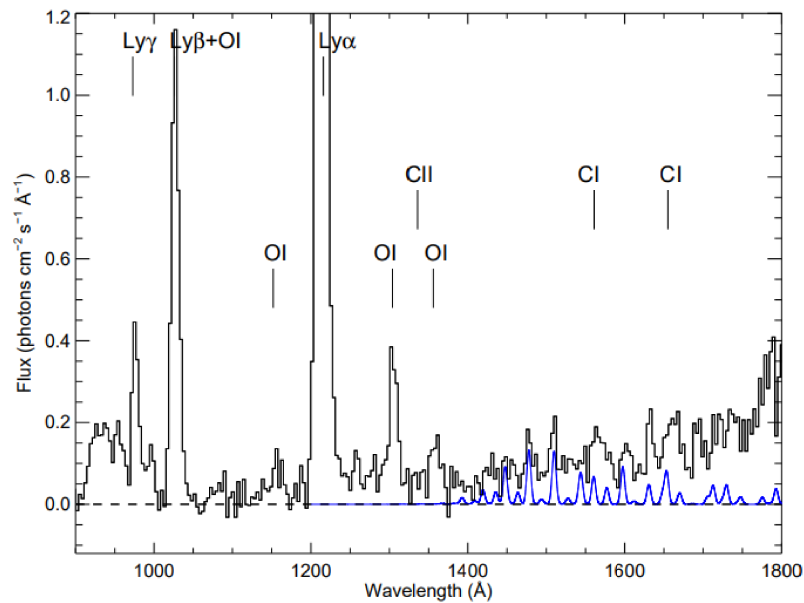
Dalla configurazione strutturale dei ghiacci presenti nel nucleo cometario si può dedurre la quantità di radiazione a cui sono stati esposti e quindi il tempo di permanenza del nucleo nelle regioni interne del sistema solare. Il ghiaccio d'acqua formatosi a basse temperature e pressione si presenta in forma amorfa (struttura disordinata), mentre a 135K viene convertito in forma cristallina cubica e tra 200 e 273 K in forma cristallina esagonale (strutture ordinate) (Encrenaz, 2008 [29]). Ghiacci amorfi e cristallini presentano spettri differenti, quindi questa struttura può essere rintracciata spettroscopicamente (Jenniskens and Blake, 1996 [44]; Zheng et al. 2009 [84], [85]).

Lo studio degli spettri cometari permette, in alcuni casi, il riconoscimento di più fonti di sublimazione. Di solito i gas vengono espulsi solo dal nucleo, ma talvolta si riscontrano dei tassi di produzione di alcune molecole molto alti rispetto alle dimensioni della superficie. Questo fenomeno può essere spiegato supponendo che siano stati espulsi nella chioma diversi grani ghiacciati, che agiscono da fonti aggiuntive di sublimazione. Le comete con questa caratteristica si dicono iperattive e verranno approfondite nel Capitolo 2.

⁴i più frequenti sono D/H , $^{16}O/^{18}O$ e $^{12}C/^{13}C$.



(a) Spettro nella regione del vicino infrarosso a $3\mu\text{m}$. Fonte: Bonev et al. 2021 [11]



(b) Spettro nella regione ultravioletta tra 800 e 1800\AA . Fonte: Feldman et al. 2015 [32]

Figura 1.4: Esempi di spettri cometari in diverse bande. Si osservano le righe di emissione degli elementi volatili sovrapposte al continuo.

Capitolo 2

Il rapporto D/H

Il rapporto D/H è un parametro che misura l'abbondanza di deuterio rispetto all'idrogeno. Il deuterio è l'isotopo pesante dell'idrogeno che presenta nel nucleo un neutrone oltre al protone, ed ha una grande importanza in astronomia. Le prime tracce di deuterio nell'universo risalgono alla fase della nucleosintesi primordiale, avvenuta circa due minuti dopo il Big Bang, in cui è stato prodotto con un'abbondanza relativa teorizzata (e poi misurata con successo) pari a $D/H = (2.55 \pm 0.02) \cdot 10^{-5}$ (Riemer-Sørensen & Jenssen, 2017 [68]). Dopo questo evento non si hanno notizie di ulteriori fenomeni di produzione del deuterio: a differenza degli altri elementi, dopo la nucleosintesi primordiale non viene mai creato ma solo distrutto (Ceccarelli et al. 2014 [17]). Le stelle appena formate distruggono efficientemente tutto il deuterio nei loro nuclei ancora prima di raggiungere la sequenza principale, per mezzo della reazione $D + H \rightarrow He + \gamma$. Questa particolarità lo rende fondamentale per la ricerca; le abbondanze misurate di deuterio sono un collegamento diretto con le condizioni primordiali della nube molecolare da cui si è formato il Sole e quindi un ottimo tracciante della storia di formazione dei corpi del sistema solare.

2.1 Frazionamento isotopico

Data l'assenza di fonti di sintesi del deuterio, ci si potrebbe aspettare che i corpi rocciosi formati nelle regioni distanti dalla zona di influenza delle stelle, presentino rapporti D/H consistenti con l'abbondanza primordiale. Invece ciò che si osserva è una distribuzione di valori complessivamente più alti. A titolo di esempio sono riportate nella Tabella 2.1 i rapporti D/H di alcune comete, tra cui si distingue 67P, con la quantità più alta finora

registrata per una cometa gioviana (Altwegg et al. 2015 [3]; Fulle, 2021 [34]). Deve quindi esistere un processo che modifichi il livello di deuterazione delle molecole.

Il frazionamento del deuterio è il fenomeno principalmente responsabile dei valori attuali del D/H nel sistema solare. Può essere riassunto dalla formula di reazione



Alle temperature tipiche delle nubi molecolari, intorno a 10 – 50 K la reazione è esotermica verso destra, mentre la direzione contraria richiede un'energia di attivazione che viene raggiunta solo a temperature superiori a 232 K (Etim et al. 2021 [30]). La specie H_2D^+ che si forma in queste condizioni genera le varianti D_2H^+ e D_3^+ , interagendo con HD . Successivamente il deuterio viene legato agli altri elementi più comuni (O , C ed N) tramite reazioni di spostamento che avvengono sia in fase gassosa che sulla superficie dei grani ghiacciati (Ceccarelli et al. 2014 [17]).

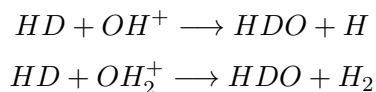
Una molecola a base di idrogeno e la sua controparte isotopica si differenziano per l'energia del livello fondamentale (ZPE, *Zero Point Energy*), infatti la specie deuterata ha sempre una ZPE inferiore. Da questa quantità (ΔE) e dalla temperatura della nube molecolare T si calcola il fattore di Boltzmann $\Delta E/k_B T$, un parametro che rappresenta l'entità del frazionamento, che risulta essere direttamente proporzionale a tale fattore. Fissata la differenza nella ZPE di un determinato sistema, il frazionamento dipende solo dalla temperatura: a basse temperature la deuterazione è favorita e la reazione (2.1) procede verso destra, mentre ad alte temperature avviene la reazione contraria, e l'abbondanza isotopica del deuterio diminuisce (Etim et al. 2021 [30]). Alla luce di ciò sono attesi valori alti del D/H nelle regioni esterne più fredde e valori inferiori in prossimità del Sole.

2.2 L'importanza dell'acqua

L'acqua è composta da due degli elementi più abbondanti nell'universo ed è presente in grande quantità nelle nubi molecolari (Hollenbach et al. 2009 [42]; Rawlings et al. 2020 [66]; Lunine 2006 [55]). Nel sistema solare sussiste prevalentemente in forma ghiacciata oltre la *frost line*¹. L' H_2O si forma sulla superficie dei grani ghiacciati (Kalvans & Shmied, 2010 [46]) che in seguito ad una fase di accrescimento vanno a formare i corpi minori del

¹La *frost line* rappresenta la distanza dalla stella oltre la quale gli elementi volatili condensano stabilmente nella loro forma solida. Nel sistema solare questo confine è posto (per l'acqua) a circa 5 UA dal Sole (Encrenaz, 2008 [29])

sistema solare (Quénard et al. 2016 [64]; Boogert et al. 2015 [12]; Caselli et al. 2012 [15]; de Bergh, 1993 [25]; Lunine 2006 [55], Lis et al. 2019 [54]). Il suo isotopo HDO si forma con le stesse modalità descritte nel precedente paragrafo secondo le reazioni



e presenta delle transizioni facilmente individuabili nell'infrarosso e nel submillimetrico (paragrafo 2.4). L'acqua è infine il costituente volatile principale delle comete. Come ampiamente discusso nel Capitolo 1, questi corpi conservano nei loro nuclei ghiacci quasi del tutto incontaminati dalla radiazione solare, fin dal momento della loro formazione. La misura del rapporto D/H nell'acqua delle comete costituisce uno degli strumenti di indagine più potenti non solo delle origini del sistema solare, ma delle caratteristiche generali delle nubi molecolari e delle regioni di formazione stellare (Encrenaz, 2008 [29]).

2.3 L'acqua terrestre

La presenza stessa di acqua sulla Terra ha costituito un dilemma per lungo tempo. Nel sistema solare primordiale, quando ancora permaneva un disco protoplanetario diffuso di gas e polveri attorno al Sole, si venne a costituire un gradiente radiale di composizione. Gli elementi iniziarono a condensare per raggiungere la loro forma più stabile, ognuno in zone diverse in base alla propria temperatura di condensazione. Vicino al Sole, per distanze minori di 3 UA si formarono planetesimi di rocce e metalli, principalmente silicati. Oltre la *frost line* invece, la condensazione degli elementi più leggeri diede vita a planetesimi ghiacciati, composti di C , N , O e H , instabili a distanze inferiori dal Sole. I pianeti interni quindi si sono formati unicamente dall'accrescimento dei planetesimi rocciosi.

L'evento che presumibilmente portò l'acqua nelle regioni interne viene chiamato *Late Heavy Bombardment* (bombardamento intenso tardivo) ed è una conseguenza della migrazione dei pianeti giganti, spiegata dalla teoria del *Grand Tack*. Secondo questo modello Giove e Saturno sarebbero entrati in interazione mareale, spostandosi prima verso l'interno, fino a 1.5 UA e poi verso l'esterno, raggiungendo la posizione attuale. Questi moti alterarono le orbite originarie dei planetesimi rocciosi e ghiacciati, mischiando le due popolazioni e causando una pioggia di ghiaccio verso i pianeti interni (Walsh et al. 2011 [78]).

Le comete sono state tra i primi corpi a formarsi nelle regioni esterne, quindi si può supporre

che l'acqua terrestre abbia origine cometaria. Per avere conferma di questa teoria bisogna misurare il D/H su un ampio campione di comete e confrontarlo con la deuterazione media degli oceani, data dal VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) pari a $(1.5576 \pm 0.0001) \cdot 10^{-4}$.

2.4 Metodi di misura

In una molecola del tipo H_nR , la frazione isotopica si indica con la formula

$$[D]/[H]_{H_nR} = \frac{1}{n} \frac{[H_{n-1}DR]}{[H_nR]} \quad (2.2)$$

dove le parentesi quadre indicano una misura di abbondanza (Bockelée-Morvan et al. 2004 [9]). Quando è necessario un confronto rispetto ad un valore noto, si usa il δD

$$\delta D = 1000 \cdot \left(\frac{D/H_{campione}}{D/H_{standard}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

dove *standard* è il valore di riferimento, per esempio quello del VSMOW (Hallis, 2017 [38]). Il rapporto D/H può essere misurato in due modi: per via spettrometrica *in situ* o per via spettroscopica tramite telescopi spaziali o *ground-based*. La prima strada è la più impegnativa tecnicamente, ma anche la più facile dal punto di vista delle analisi. Prevede il lancio di una missione spaziale che raggiunga brevi distanze dal nucleo di una cometa. Esempi di missioni simili sono Giotto per la cometa 1P/Halley (600 km dal nucleo) e Rosetta per la cometa 67P (10 km dal nucleo) (Altwegg et al. 2015 [3]; Eberhardt et al. 1987 [28]). Queste sonde furono equipaggiate con degli spettrometri di massa, strumenti che ionizzano le particelle entranti e le accelerano, inserendole su orbite la cui curvatura dipende dal rapporto massa su carica. Con questo metodo si ricostruisce una distribuzione di massa delle particelle campionate, da cui si può risalire direttamente al D/H (Balsiger et al. 2007 [4]) (Figura 2.2 (a)).

La via spettroscopica invece prevede l'analisi della luce della chioma e della coda cometaria, per individuare le transizioni appartenenti ad ogni specie isotopica, che tipicamente sono transizioni rotazionali o bande rotovibrazionali della molecola (Kulczak-Jastrzebska, 2017 [48]; Lis et al. 2019 [54]). Le transizioni rotazionali e vibrazionali sono una prerogativa delle specie poliatomiche e sono causate rispettivamente dalla rotazione e dalla vibrazione degli atomi attorno al centro di massa della molecola. Questi moti sono associati a livelli

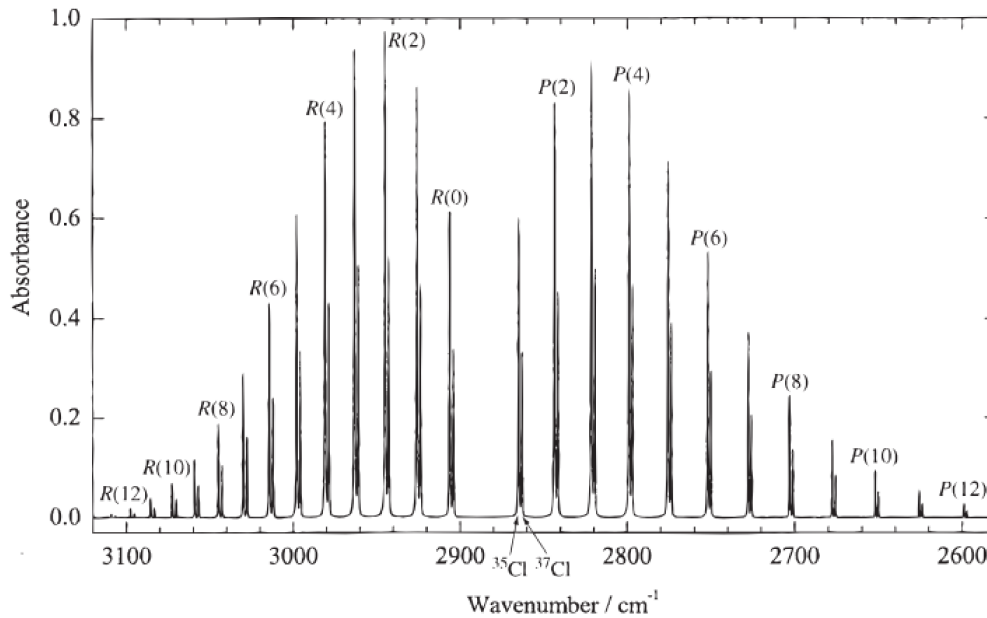


Figura 2.1: Spettro rotovibrazionale dell' HCl corrispondente a $v = 1 - 0$. Si notano i P e R branch, le due serie di righe della banda poste simmetricamente rispetto alla costante vibrazionale ω_0 . Fonte: Bresolin, F., *Astronomical Spectroscopy*, pag. 56, 2018 [13].

di energia quantizzati e generano sistemi fitti di righe negli spettri. Quando una transizione rotazionale avviene lungo un livello vibrazionale con numero quantico $\Delta v = -1$, si produce una banda rotovibrazionale². In Figura 2.1 si osserva un esempio di spettro rotovibrazionale del HCl .

Tali transizioni sono rilevabili nella zona infrarossa-submillimetrica dello spettro. Le più utilizzate per la misura del D/H sono la $1_{0,1} - 1_{1,0}$ a $\nu = 547$ GHz e $\nu = 509$ GHz rispettivamente dell' H_2O e HDO , oppure la $1_{1,0} - 0_{0,0}$ dell' HDO nel submillimetrico a 465 GHz (Kulczak-Jastrzebska, 2017 [48]; Tennyson et al. 2010 [77]).

Per misure di abbondanza, come in questo caso, è tipicamente preferito l'utilizzo di righe di emissione otticamente sottili³. In questa approssimazione la larghezza equivalente W_ν della riga risulta direttamente proporzionale alla densità di colonna N dell'elemento. La densità di colonna è legata al numero di particelle assorbenti o emittenti n dalla formula di

²Bresolin, F., *Astronomical Spectroscopy*, cap. 3, pagg. 54-56, 2018 [13]; Banwell, C. N., *Fundamentals of Molecular Spectroscopy*, cap.3 pagg. 81-86, 1983 [5]

³Una riga si dice otticamente sottile quando ha una profondità ottica $\tau \ll 1$.

definizione

$$N = \int_0^L n dl \quad (2.4)$$

dove l rappresenta la dimensione dello strato assorbente o emittente. Quindi dalla misura di N si può risalire direttamente all'abbondanza dell'elemento che genera la riga ⁴. Per questa ragione spesso in letteratura il D/H viene misurato dalle transizioni di HDO e $H_2^{18}O$ (mostrate in Figura 2.2 (b)): questi isotopi appartengono ad una delle specie più diffuse nelle comete (e nell'universo in generale) e generano delle transizioni otticamente sottili (Ceccarelli et al. 2014 [17]; Hartogh et al. 2011 [39]).

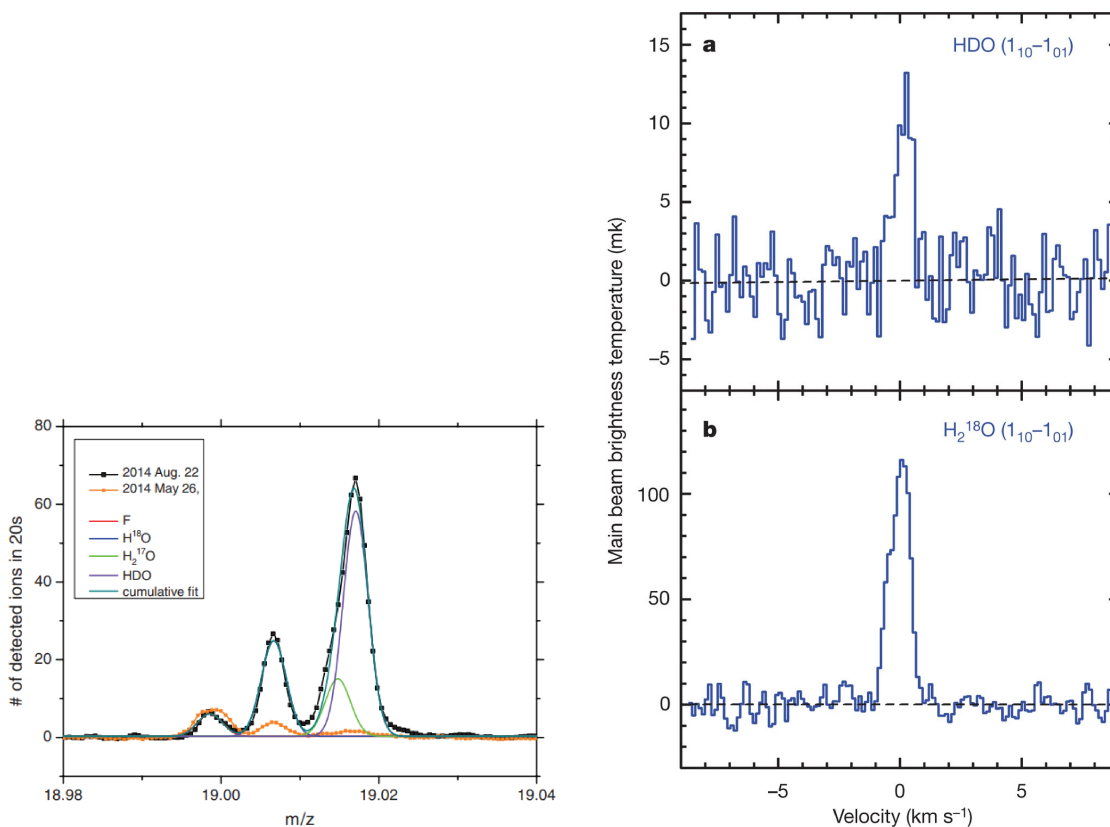
I dati spettroscopici e spettrometrici richiedono interpretazioni molto diverse. Lo spettrometro (Figura 2.2 (a)) genera un grafico di distribuzione della massa atomica, quindi permette di conoscere direttamente la natura della particella entrante. Lo spettrografo invece (Figura 2.2 (b)) rileva le transizioni molecolari che, per confronto con i modelli di emissione, permettono di risalire alla molecola che genera le righe. Una criticità dell'analisi spettroscopica è rappresentata dal fatto che, per avere dei valori attendibili della frazione di deuterio, è necessario misurare simultaneamente l'abbondanza isotopica degli altri elementi presenti nella molecola, così da evitare di introdurre eventuali *bias* dovuti a differenze di attività della cometa durante i periodi di osservazione (Ceccarelli et al. 2014 [17]). Nel caso dell'acqua è necessario ricavare l'abbondanza dell'ossigeno $^{16}O/^{18}O$, oppure farne una stima ragionevole (Altwegg et al. 2015 [3]). Per le missioni spaziali questo dato viene rilevato immediatamente dallo spettrometro.

2.5 Il D/H nelle comete

In Tabella 2.1 si riportano le misure del D/H di un campione di comete.

Si riscontrano abbondanze di deuterio estremamente varie. Confrontando le misure con il VSMOW, si nota che le comete spaziano tra valori prossimi a quello terrestre (103P/Hartley 2 (103P), 46P/Wirtanen (46P), 45P/H-M-P (45P)), fino a raddoppiare o addirittura triplicare il valore terrestre. Un caso eccezionale è quello della cometa 67P che presenta il più alto D/H misurato finora per una cometa gioviana. Esaminando questi risultati si nota che non solo le comete non hanno valori del D/H consistenti con quello terrestre, ma non sono coerenti neanche tra loro. Questa evidenza è in chiara contraddizione con quanto

⁴Bresolin, F., *Astronomical Spectroscopy*, cap.3, pagg.80-82, 2018 [13]



(a) Esempio di misurazione effettuata con uno spettrometro di massa. Si osservano i picchi di massa di diversi elementi elencati in legenda. (Fonte: Altwegg et al. 2015 [3])

(b) Esempio di misurazione effettuata con uno spettrografo. Si osservano i picchi di emissione dell' $H_2^{18}O$ (in basso) e dell'HDO (in alto). (Fonte: Hartogh et al. 2011 [39])

Figura 2.2: Confronto fra output di spettrometro e spettrografo.

Nome	Famiglia	Strumento	D/H [10^{-4}]	Fonte
1P/Halley	Halley type	GIOTTO	3.16 ± 0.34	[28]
103P/Hartley 2	JFC	HSO	1.61 ± 0.24	[39]
67P/C-G ⁽¹⁾	JFC	ROSETTA	5.3 ± 0.7	[3]
45P/H-M-P ⁽²⁾	JFC	Herschel	< 2.0	[53]
46P/Wirtanen	JFC	SOFIA	1.61 ± 0.65	[54]
C/1996 B2 (Hyakutake)	Long Period	CSO	2.9 ± 1.0	[8]
C/1995 O1 (Hale Bopp)	OCC	JCMT	3.3 ± 0.8	[24]
C/2014 Q2 (Lovejoy)	OCC	Odin	1.4 ± 0.4	[6]

Tabella 2.1: Valori del D/H per alcune comete di varie famiglie. I valori riportati sono stati ricavati dalla transizione a $465GHz$ dell'*HDO*. HSO= Hershel Space Observatory, CSO=Caltech Submillimeter Observatory, JCMT=James Clerk Maxwell Telescope.

(1)= Churyumov-Gerasimenko

(2)= Honda-Mrkos-Pajdušáková

stabilito nel paragrafo 2.1: le comete della nube di Oort dovrebbero presentare rapporti D/H maggiori delle JFC, dal momento che si sono formate in regioni più fredde del sistema solare. La questione è tuttora dibattuta. Una possibilità è supporre che si inneschino dei meccanismi ulteriori di frazionamento, legati in particolare alla sublimazione, che alterino i valori del D/H. Questa eventualità è già stata vagliata tramite una serie di esperimenti che portano però a conclusioni discordi. Le analisi compiute da Moores et al. (2012 [59]) su campioni di ghiaccio e polvere mostrano che il D/H decresce col tempo durante la sublimazione; Yao e Giapis (2017 [82]) invece discutono un tipo di interazione tra ioni d'acqua accelerati e specie deuterate (reazioni di Eley-Rideal) presenti sulla superficie della cometa, che provocano, al contrario, un aumento istantaneo del rapporto D/H. Questa evenienza costituirebbe in realtà un effetto stagionale, in quanto il tasso di formazione degli ioni, che innescano le reazioni sopracitate, dipende dalla distanza dal Sole.

Esperimenti condotti su campioni di acqua pura da Lécuyer et al. (2017 [51]) non mostrano variazioni significative. Tuttavia l'evaporazione dell'acqua pura potrebbe non essere adeguatamente rappresentativa dei fenomeni che avvengono nelle chiome cometarie (Paganini et al. 2017 [61]).

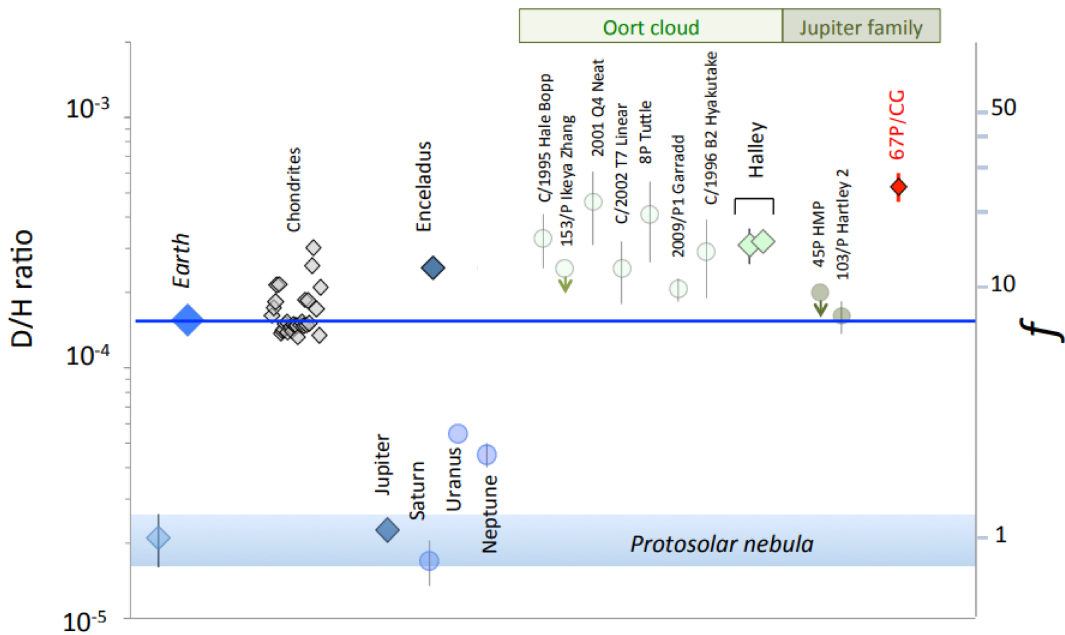


Figura 2.3: Valori D/H in vari corpi del sistema solare. Il valore terrestre è riportato a scopo di confronto. Fonte: Altwegg et al. 2015 [3]

I valori misurati per le comete portarono ad abbandonare la possibilità che l'acqua terrestre fosse di origine cometaria in favore dell'ipotesi che i principali responsabili fossero gli asteroidi. Dalle misure del D/H sulle condriti carbonacee, una classe di meteoriti dai quali si può risalire indirettamente alla composizione degli asteroidi primitivi, risultano valori più in accordo con il VSMOW, come si può notare in Figura 2.3, in particolare le tipologie CI e CM (Alexander et al. 2012 [2]), con risultati pari a $\sim 1.45 \cdot 10^{-4}$ (Robert, 2002 [70]).

2.6 L'iperattività

Recenti misurazioni hanno riportato in auge il dibattito, rilevando una correlazione tra iperattività delle comete e rapporto D/H (Lis et al. 2019 [54]; Fulle 2021 [34]). L'iperattività si definisce come un alto valore del rapporto tra la superficie attiva (ossia da cui sublima il gas) e superficie totale del nucleo. Questa caratteristica si può spiegare supponendo che il nucleo espella grani ghiacciati nella chioma, che agiscono da sorgenti di sublimazione secondarie. La correlazione si può osservare in Figura 2.4 dove è riportato il valore terrestre

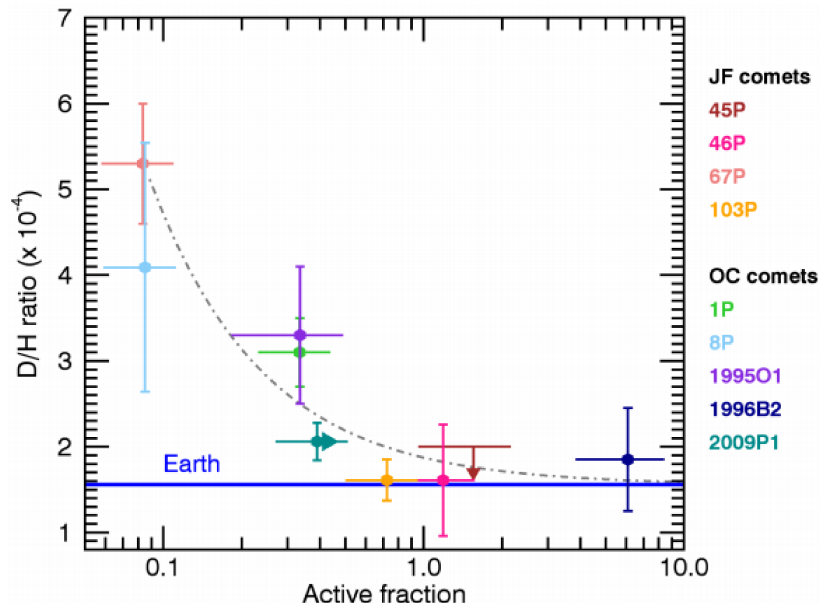


Figura 2.4: Correlazione tra frazione attiva e rapporto D/H. Fonte: Lis et al. 2019 [54]

a scopo di confronto: le comete iperattive più note in letteratura (103P e 46P) hanno il valore più compatibile con il VSMOW (Lis et al., 2019 [54]; A'Hearn et al. 2011 [1]).

Un primo modello che spiega l'iperattività delle comete è quello ideato da A'Hearn et al. (2011 [1]) in seguito ai risultati della missione EPOXI (*Extrasolar Planet Observation and Deep Impact Extended Investigation*), che nel 2010 ha raggiunto una distanza di 694 km dal nucleo della cometa 103P. La sonda Deep Impact ha acquisito diverse immagini, rivelando un nucleo composto da due subunità collegate da una vallata liscia, insieme ad un accumulo di grani di ghiaccio d'acqua nella chioma. Come si può notare in Figura 2.5, il vapore acqueo sublima dalla vallata, mentre il ghiaccio d'acqua è distribuito nei grani attorno alla chioma. A'Hearn, per collegare i dati di EPOXI con le evidenze dell'iperattività della cometa, descrisse un meccanismo del tutto innovativo di sedimentazione cometaria. Quando il nucleo raggiunge la distanza eliocentrica adatta, il CO_2 inizia a sublimare dall'interno, creando un getto di gas che provoca l'espulsione di grani ghiacciati. Le particelle che hanno acquisito una velocità sufficiente a sfuggire alla gravità del nucleo si concentrano nella chioma ancora prima che si inneschi il processo di sublimazione dell'acqua e vengono spinti dalla pressione di radiazione nella direzione opposta al Sole. I grani più lenti invece ricadono nella vallata del nucleo dove subiscono irraggiamento da parte dei fotoni solari che innesca il processo

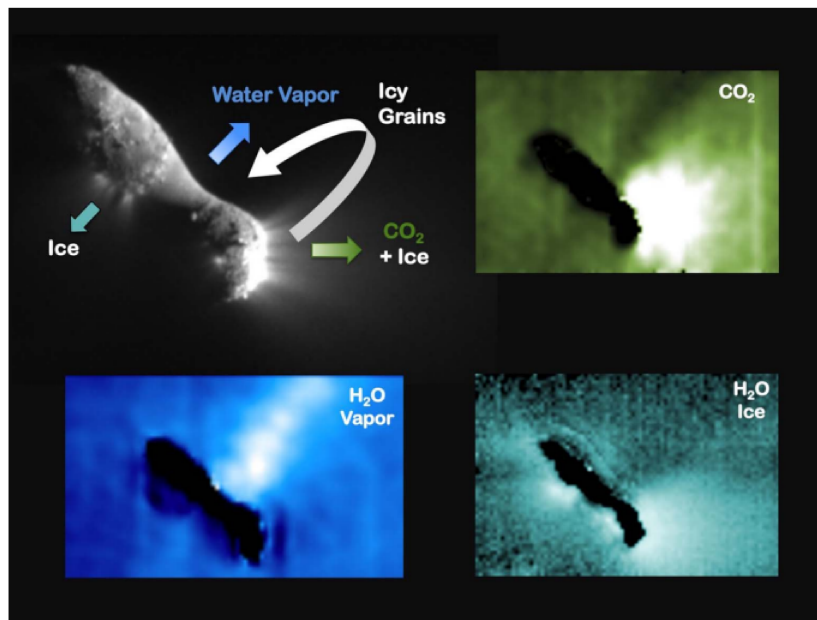


Figura 2.5: Immagini della cometa 103P/Hartley 2 riportate dalla sonda Deep Impact. È riportata la distribuzione di H_2O e CO_2 , insieme ad una rappresentazione schematica del modello di iperattività di A'Hearn. Fonte: A'Hearn et al. 2011 [1].

di frazionamento. In questo modo risultano due sorgenti distinte di vapore acqueo, che aumentano il tasso di produzione dell' H_2O e causano l'iperattività. Rimane ancora da chiarire cosa porti una cometa iperattiva ad avere un D/H terrestre.

Per quanto efficace, il modello di A'Hearn presenta delle criticità: innanzitutto si calcola che la pressione esercitata dai supervolatili sia insufficiente a vincere le forze coesive vigenti nel nucleo. La sublimazione del ghiaccio dalla superficie inoltre dovrebbe generare una crosta refrattaria ed estinguere la cometa nel giro di pochi giorni.

Per trovare una soluzione a tali quesiti è stato proposto un altro modello da Fulle et al. (2019 [33], 2021 [34]); si definisce una nuova struttura di nucleo, composto da diverse subunità della dimensione di alcuni centimetri (Blum et al. 2017 [7]), distinte in frammenti P (poveri d'acqua) e frammenti R (ricchi d'acqua), in base alla regione in cui si sono formati. I frammenti P contengono le sostanze più antiche, mentre i frammenti R, formatisi durante la condensazione dell'acqua alla frost line, presentano un D/H compatibile con il valore terrestre (Fulle 2021 [34]). Le caratteristiche di ogni oggetto possono dunque essere delineate sulla base dell'abbondanza relativa di frammenti P ed R.

Quando una cometa raggiunge il sistema solare interno, i frammenti più esterni vengono irradiati dalla luce solare. Il ghiaccio di CO o CO_2 contenuto al loro interno inizia a sublimare e a diffondersi, provocando la deidratazione del frammento, che viene successivamente distrutto dal gradiente di densità generato dalla diffusione del gas. I grani rilasciati dalla disintegrazione del frammento seguono il moto già descritto dal modello di A'Hearn. Calcolando i tempi scala di deidratazione e confrontandoli con quelli di erosione della superficie, si osserva che un frammento si può disintegrare anche mantenendo un alto tasso di idratazione, quindi la cometa può rimanere costantemente attiva durante l'intero passaggio al perielio.

L'iperattività dunque è causata non da una sovrabbondanza di acqua nel nucleo, ma da una forte presenza di elementi più volatili dell'acqua. Una cometa CO_2 -depleted ad esempio, non potrà mai mostrare tratti di iperattività. Estendendo questo concetto anche ad altri elementi, risulta che ogni cometa può mostrare questa caratteristica in qualche misura. Dal punto di vista teorico è sufficiente che il nucleo contenga frammenti composti da elementi con una consistente differenza di volatilità per innescare il meccanismo di espulsione (Sunshine & Feaga, 2021 [76]).

Capitolo 3

La missione SOFIA

3.1 Obiettivi e punti di forza

SOFIA (*Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy*) è un progetto nato dalla collaborazione tra NASA e DLR (*German Aerospace Center*). La missione è costituita da un aeromobile boeing 747-SP, mostrato in Figura 3.1, modificato appositamente per ospitare a bordo un telescopio rifrattore. Fu originariamente costruito nel 1977 ed eseguì il primo volo scientifico solo nel 2010 a causa di gravi ritardi nel progetto (Heyminck et al. 2012 [41]), quando ormai il suo predecessore KAO (*Kuiper Airborne Observatory*) aveva concluso le attività da 15 anni. Le osservazioni vengono condotte durante voli notturni di 10 ore, ad altezze medie in stratosfera di 13.7 km. SOFIA è stata ideata per osservare nella banda dello spettro elettromagnetico che va dal visibile al submillimetrico, in particolare da 0.3 μm a 1.6 mm. In questa regione ricadono le emissioni di svariati oggetti celesti, tra cui nebulose e regioni di formazione stellare, buchi neri, galassie, pianeti e corpi minori del sistema solare e atmosfere planetarie¹.

Un telescopio stratosferico presenta alcuni vantaggi rispetto ai corrispettivi terrestri e spaziali. I telescopi terrestri sono necessariamente vincolati alle zone di assorbimento dell'atmosfera, in particolare la troposfera, lo strato atmosferico dove si concentra l'80% della massa totale di gas e aerosol. Sono qui condensate le molecole note come gas serra che riscaldano le zone a bassa quota, garantendo la temperatura adatta per la permanenza di

¹Le informazioni sulla missione SOFIA sono state prese dalla pagina ufficiale <https://www.sofia.usra.edu> e dal sito della NASA https://nasa.gov/mission_pages/SOFIA

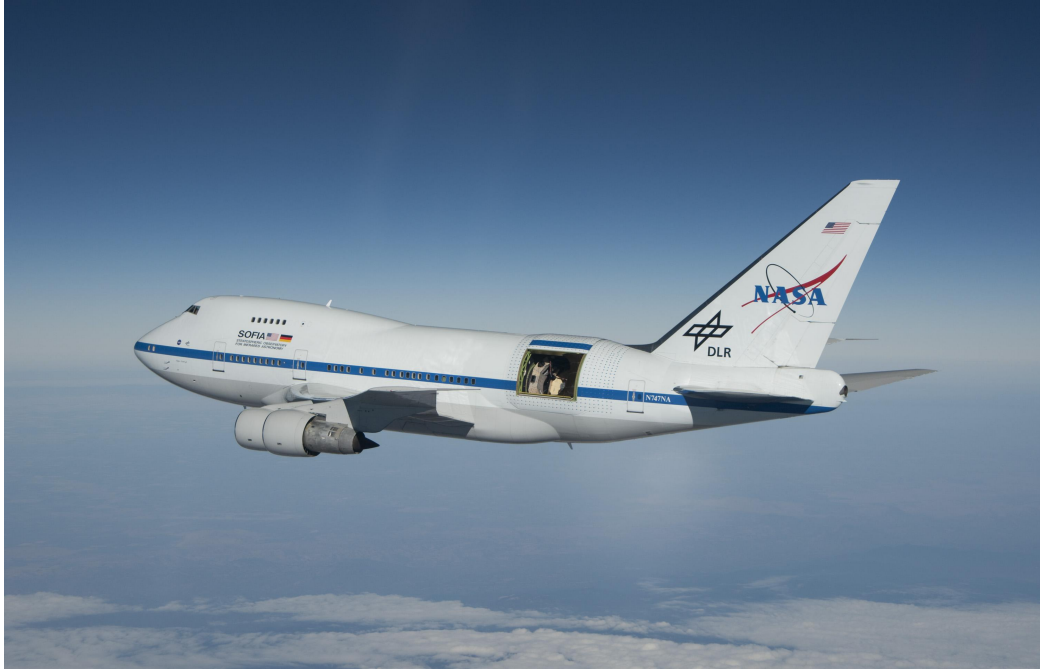


Figura 3.1: Immagine dell'aeromobile in volo. Fonte: <https://nasasearch.nasa.gov>

acqua allo stato liquido; un aspetto fondamentale per la vita sulla Terra, ma allo stesso tempo il principale limite per la ricerca astronomica. Le molecole come l' H_2O e CO_2 presentano infatti delle transizioni vibrazionali, le cosiddette bande molecolari, che assorbono una frazione importante della luce alle lunghezze d'onda dell'infrarosso. Ad esclusione delle cinque bande di trasmissione del sistema Johnson² nel vicino IR, per λ superiori di $\sim 5\mu m$ si ha trasmissione quasi nulla, fino alla finestra radio. La quota media raggiunta dall'aeromobile consente di eludere il 99.8% del vapore acqueo responsabile del taglio atmosferico (Young et al. 2012 [83]). In Figura 3.2 si può apprezzare la differenza di visibilità nelle immagini raccolte in stratosfera, rispetto a quelle ottenute su uno dei siti di osservazione migliori sulla Terra, l'osservatorio di Mauna Kea.

Nello spazio la radiazione non è soggetta all'assorbimento della luce ultravioletta, ad opera dell'ozonofera e alla riflessione delle onde decametriche in ionofera, dunque un telescopio spaziale risulta ancora meno affetto dall'assorbimento atmosferico, ma a differenza di SO-

²rispettivamente: la J a $1.2\mu m$, la H a $1.6\mu m$, la K a $2.21\mu m$, la L a $3.6\mu m$ e la M a $4.8\mu m$.

FIA, non ha la possibilità di cambiare strumentazione e quindi non può variare obiettivi nel corso della missione.

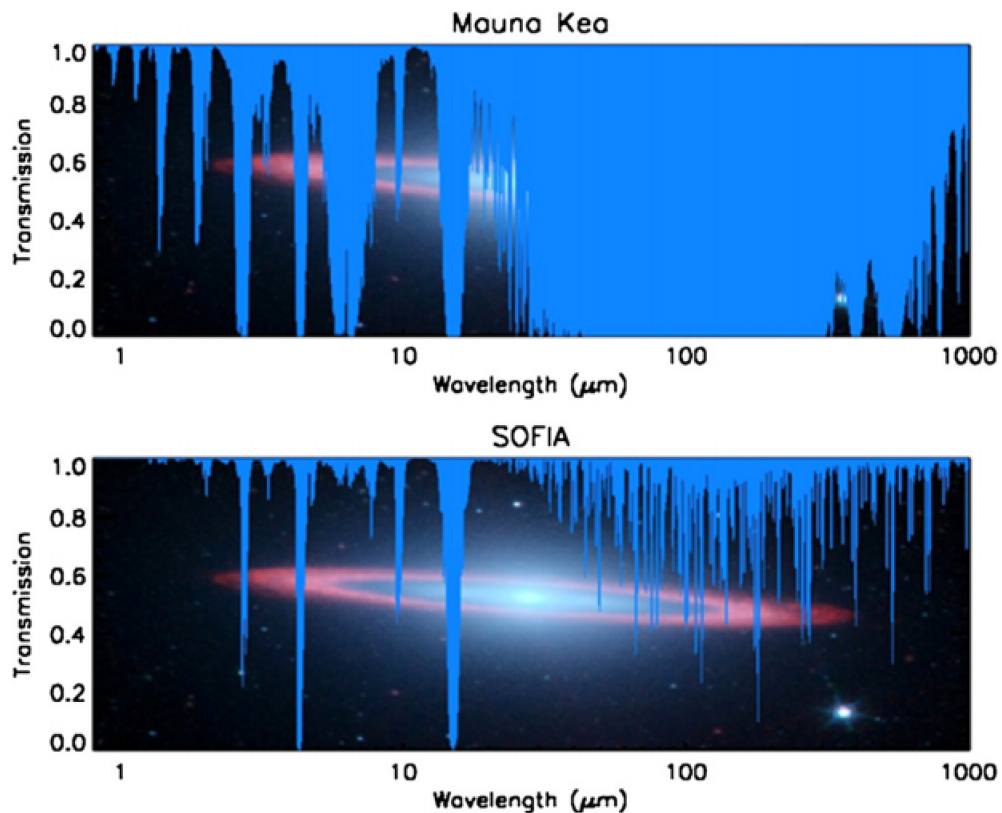


Figura 3.2: Confronto tra la trasmissione in sito terrestre (Mauna Kea, $4.2km$) e SOFIA, $13.7km$. In media la trasmissione in stratosfera è migliore dell'80% rispetto a terra. Fonte: Krabbe et al. 2013 [47]

3.2 Caratteristiche strumentali

La missione SOFIA è equipaggiata con due strumenti fissi, il telescopio e la camera CCD FPI (*Focal Plane Imager*): tutti gli altri componenti sono variabili e consentono l'osservazione di obiettivi molto diversi per ogni volo scientifico.

Il telescopio rifrattore, mostrato in Figura 3.3, è in configurazione Cassegrain con un fuoco Nasmyth, presenta uno specchio primario parabolico di $2.7m$ di diametro e un secondario iperbolico di $0.35m$. Il fuoco Nasmyth del telescopio viene raggiunto dal fascio di fotoni

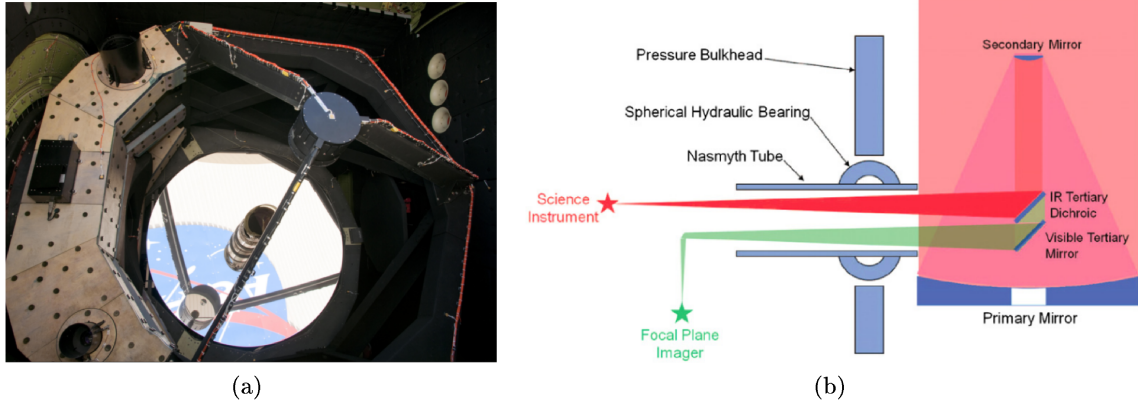


Figura 3.3: Immagine (a) e schema (b) del telescopio a bordo.

Fonti: (a) https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1974.html

(b) Krabbe et al. 2013 [47]

grazie ad uno specchio terziario dicroico laminato d'oro che lo divide in una componente infrarossa rifratta e una visibile, successivamente indirizzate verso la strumentazione scientifica per essere analizzate. Il fascio ottico subisce un'ulteriore deviazione per raggiungere la camera FPI. La posizione del rifrattore viene modulata tramite un sistema a pressione idraulica che consente un range di elevazione (altezze) di $23^\circ - 58^\circ$ e un tracking dell'angolo di azimuth di soli $\pm 3^\circ$. Per questo motivo la posizione dell'aeromobile dev'essere periodicamente corretta per mantenere l'oggetto in esame nel campo di vista del telescopio. La sezione dove sono alloggiati gli strumenti per l'analisi della luce rimane pressurizzata, in modo che sia accessibile durante il volo.

Di seguito invece si descrivono in breve gli strumenti accessori della missione. Le caratteristiche e i dettagli specifici di tali strumenti sono riassunti in Tabella 3.1.

- FORCAST (*Faint Object infraRed CAmera for the Sofia Telescope*) :

è una camera a doppio canale con spettrometro a grism che opera nel medio infrarosso, a lunghezze d'onda comprese tra $5\mu m$ e $40\mu m$. Il fascio in ingresso dal telescopio può essere diviso da un *beamsplitter* nei due canali, ottenendo un imaging simultaneo in due diverse bande: $5 - 28\mu m$ nel canale a corte λ (SWC) e $28 - 40\mu m$ nel canale a lunghe λ (LWC). È possibile aumentare la produttività dello strumento modificando la configurazione dello spettrometro (operazione che può essere compiuta in volo) sostituendo lo splitter con uno specchio ed indirizzando il fascio in una delle due camere (*single channel imaging*).

Per adattarsi a qualunque esigenza di ricerca, FORCAST presenta un ampio set di grism, filtri e maschere per la spettroscopia longslit e multiobject.

- GREAT (*German REceiver for Astronomy at Terahertz frequencies*): ricevitore *heterodyne* multicanale operativo nel range di frequenze 0.49 – 4.74 THz per la spettroscopia nel lontano infrarosso e submillimetrico. È uno strumento dual-color, ossia può registrare due bande di frequenza simultaneamente. L'output è una combinazione amplificata del segnale della sorgente con il segnale di un oscillatore locale (LO) ad una frequenza controllata ν_{LO} .
- FIFI-LS (*Far Infrared Field-Imaging Line Spectrometer*): spettrometro integral field attivo nel lontano infrarosso. Contiene due spettrometri a grating indipendenti con lo stesso campo visivo, uno in 51 – 120 μm , l'altro in 115 – 200 μm .
- EXES (*Echelon-CROSS- Echelle Spectrograph*): spettrografo Echelle per il medio infrarosso. L'alta risoluzione di questo strumento è garantita da un grating *echelon* a riflessione con un alto angolo di blaze, combinato con un cross disperser. Queste caratteristiche permettono lo studio delle bande molecolari tipicamente trattenute dall'atmosfera terrestre, come l'idrogeno molecolare, il vapore acqueo e il metano che provengono da nubi molecolari, dischi protoplanetari e atmosfere planetarie. EXES può cambiare la sua configurazione, variando la risoluzione spettrale secondo necessità.
- HAWC (*High-resolution Airborne Wideband Camera*): camera e polarimetro per il lontano infrarosso. Progettato per rilevare l'orientazione della polarizzazione dei fotoni entranti, così da poter dedurre (indirettamente) il campo elettromagnetico della regione osservata.

3.3 Possibilità osservative di GREAT

Lo strumento GREAT risulta particolarmente utile per la misura del D/H come si vedrà nel capitolo successivo. Pertanto si ritiene utile approfondirne le possibilità e le varie configurazioni. Come precedentemente accennato, uno strumento heretodyne funziona grazie ai mixer, che combinano il debole segnale della sorgente a quello di oscillatori locali prossimi

Nome	Descrizione	Lunghezza d'onda [μm]	Risoluzione spettrale
FORCAST	MIR camera e grism	5 – 40	200
GREAT	spettrometro heterodyne	63 – 612	$10^6 - 10^8$
FIFI-LS	FIR spettrometro integral field	42 – 210	1000 – 3800
EXES	spettrometro Echelle	5 – 28	3000, 10^4 , 10^5
HAWC	FIR camera e polarimetro	50 – 240	
FPI	camera CCD	0.36 – 1.1	

Tabella 3.1: Caratteristiche tecniche degli strumenti accessori a bordo di SOFIA.

alla frequenza della riga di interesse scientifico. Il segnale risultante viene amplificato e ricade in due bande di frequenza poste simmetricamente rispetto alla frequenza dell'oscillatore locale. Tipicamente le bande sono denominate *image* e *signal*, stando ad indicare che le righe della sorgente debbano essere centrate nella banda *signal*; tuttavia GREAT opera in modalità *double sideband* pertanto entrambe le bande sono sensibili alla radiazione esterna e si può decidere opportunamente in quale di essere far ricadere il segnale, se nella LSB (lower sideband) o nella USB (upper sideband) (Heyminck et al. 2012 [41]; Krabbe et al. 2013 [47]).

Nel 2015 e nel 2016 le possibilità dello strumento furono ampliate, con l'aggiunta di due *array* a bassa ed alta frequenza, upGREAT/LFA e upGREAT/HFA (*low frequency* e *high frequency array*), che dal 2017 possono operare indipendentemente l'una dall'altra e simultaneamente (Risacher et al. 2018 [69]). L'*array* a bassa frequenza è composto da 14 pixel distribuiti in due *subarray* caratterizzati da polarizzazioni differenti che possono essere regolati su frequenze diverse della banda complessiva di 1.835 – 2.007 THz. L'*array* ad alta frequenza invece è costituito da 7 pixel con larghezza di banda limitata a 4.745, che corrisponde all'emissione a $63\mu\text{m}$ dell'[OI]. Nel 2018 vennero aggiunti i quattro canali della configurazione 4GREAT, formate da 4 pixel coallineati, ognuno operativo in una zona diversa dello spettro. In Figura 3.4 sono riportati i dettagli dei quattro canali di 4GREAT con gli elementi osservabili in ogni banda.

Channel	Frequency (GHz)	Astrophysical lines of interest (examples)
4G-1	491 - 635	[C I], HDO , CH , $^{(13)}\text{CH}$, $\text{H}_2^{18}\text{O}(1_{10}-1_{01})$, NH_3, CO, ArH^+, HCl , SH^+, CS^a
4G-2	890-1090	$^{(13)}\text{CO}$, HDO, $\text{H}_2^{18}\text{O}(2_{02}-1_{11})$, H_2S , OH^+ , NH , NH_2 , CS^a
4G-3	1240 - 1525	[N II], OD , $^{(13)}\text{CO}$, H_2D^+ , SH , CH, CS^a
4G-4	2490 - 2590	$^{(18)}\text{OH}$, $^{(16)}\text{OH}$, CO(22-21)

Figura 3.4: Quattro canali di 4GREAT. Sono evidenziate in grassetto le transizioni molecolari *ground-state*. Fonte: Durán et al. 2021 [27]

Capitolo 4

Proposal osservativo

Nel presente elaborato si è approfondita la tematica dell'acqua nel sistema solare, di come questa sia giunta nelle regioni interne della nube planetaria e di come la misura del parametro D/H permetta di rintracciarne l'origine fin dalla nube protosolare. Sono state fatte varie ipotesi su come le comete possano ricollegarsi alla presenza di acqua sulla Terra e si è parlato di come questo argomento possa dirsi tutt'altro che concluso; proprio quando nella ricerca si escludono tali corpi come vettori, nuove osservazioni e teorie legate al concetto di iperattività riaprono il dibattito. Questo, oltre a dimostrare quanto nella scienza non si possa mai affermare di aver compreso un fenomeno fino in fondo, apre una via per condurre nuove osservazioni e definire nuovi obiettivi.

Sunshine & Feaga (2021 [76]) hanno discusso l'utilità di missioni criogeniche che riportino sulla Terra i ghiacci espulsi dai nuclei cometari prima che questi inneschino la loro naturale sublimazione. Questo lavoro di tesi invece si propone di utilizzare la missione SOFIA per misurare il parametro D/H sulle comete. Avere più dati in questo senso permetterebbe di porre le basi di una nuova teoria che avrebbe le potenzialità per spiegare la connessione tra comete e acqua terrestre, ma anche approfondire le conoscenze attuali sulla costituzione e sulla struttura di questi corpi. Il paragrafo 2.6 si è focalizzato sul concetto di iperattività, sulla cui scia sono stati proposti nuovi modelli rivoluzionari riguardanti la struttura e l'attività del nucleo, grazie all'osservazione dei rapporti isotopici nell'acqua cometaria. In questo capitolo si vuole indicare una direzione alle future osservazioni portando un esempio concreto di un possibile proposal osservativo per il telescopio SOFIA, con l'obiettivo di fornire nuovi dati ad un panorama attualmente sottovalutato, a supporto delle teorie precedentemente affrontate (Fig.2.4; Par.2.6).

SOFIA mette a disposizione dei ricercatori periodi osservativi di durata variabile, detti cicli. Gli ultimi proposal sono stati accettati tra Giugno e Settembre 2020 per il periodo osservativo (Cycle 9) compreso tra Luglio 2021 e Settembre 2022, tuttora in corso. In attesa dell'apertura di un nuovo ciclo, questo proposal è da intendersi come progetto osservativo *Director's Discretionary Time* (DDT) al quale vengono normalmente destinate il 7% delle notti. Nel caso di fenomeni di recente scoperta (come una cometa dinamicamente nuova che si avvicina alla Terra) o di osservazioni particolarmente urgenti, si possono avanzare dei proposal in qualsiasi momento, al di fuori dei cicli osservativi. In particolare, per tempi di integrazione brevi è possibile che a tali proposal venga dedicato il tempo tra differenti piani di volo, che rimarrebbe altrimenti inutilizzato.

Nel sito ufficiale della missione vengono messi a disposizione due strumenti utili alla stesura dei proposal; il software USPOT, *Unified SOFIA Proposal and Observation Tool* (che sarà utilizzato per il calcolo delle curve di visibilità) e il SITE (*SOFIA Instrument Time Estimator*) per il calcolo del tempo di esposizione necessario a risolvere le righe¹.

4.1 Razionale scientifico

Il presente proposal si pone l'obiettivo di osservare due target cometari sui quali eseguire una misura del rapporto D/H nell'acqua cometaria. Questo parametro, uno dei principali rapporti isotopici misurabili nelle comete, si è rivelato estremamente importante per spiegare la connessione tra questi corpi e l'acqua terrestre. Sulle orme del lavoro svolto da Lis et al. (2019 [54]) si propone di proseguire il filo logico da loro suggerito, andando alla ricerca di comete che presentino un D/H terrestre. Si ritiene che la misura del D/H su un ampio campione di comete sia importante poichè tale valore costituisce il punto di partenza per ricerche di natura diversa: nel caso venisse riscontrato un valore prossimo al VSMOW si potrebbero proseguire le indagini sull'iperattività della cometa, misurandone la frazione attiva². Se invece il D/H risultasse molto diverso da quello terrestre, si potrà ricercarne il motivo, in relazione alla tipologia di frammenti che costituiscono il nucleo di tale cometa.

¹Entrambi gli strumenti sono disponibili al link: <https://www.sofia.usra.edu/science/proposing-and-observing/proposal-tools>

²In questo caso sarebbero richieste anche le misure del tasso di produzione dell'acqua, che deriva direttamente dalle righe di emissione, e delle dimensioni del nucleo

La misura del D/H si effettua attraverso la rilevazione di due righe di emissione nel submillimetrico, risultato della transizione $1_{1,0} - 1_{0,1}$ dell' $H_2^{18}O$ a 547.676 GHz e dell' HDO a 509.292 GHz. Dal rapporto delle abbondanze di deuterio e idrogeno ricavate dalle righe di emissione si può risalire al D/H, noto il rapporto tra gli isotopi dell'ossigeno $^{16}O/^{18}O$. La necessità di conoscere tale parametro si deve alla scelta della riga dell' $H_2^{18}O$ piuttosto che dell' $H_2^{16}O$, che contiene l'isotopo più abbondante in natura dell'ossigeno. Una preferenza di questo tipo è legata a motivi osservativi: l'emissione dell' $H_2^{16}O$ risulta infatti prossima ad una riga tellurica di assorbimento, che rende difficile l'estrapolazione del profilo della riga di interesse. Inoltre, a differenza dell'emissione dell' $H_2^{16}O$, la riga dell' $H_2^{18}O$ è otticamente sottile, caratteristica che semplifica le misure di abbondanza degli elementi (par. 2.4). Al fine delle osservazioni si assume che il rapporto tra isotopi dell'ossigeno sia $^{16}O/^{18}O = 500 \pm 50$, quantità utilizzata da Lis et al. (2019 [54]).

La difficoltà che si riscontra nell'ottenere tali dati spettroscopici da terra, a causa dell'assorbimento atmosferico a cui le righe sono soggette, rende il telescopio SOFIA perfettamente adatto per questo tipo di osservazioni. L'altezza raggiunta dall'aeromobile permette di eludere la quasi totalità del vapore acqueo atmosferico, responsabile dell'assorbimento in banda infrarossa e submillimetrica.

4.2 Selezione dei target

La scelta dei target per le osservazioni viene effettuata in base a varie considerazioni di natura scientifica e strumentale. Innanzitutto è possibile osservare comete che raggiungano una distanza eliocentrica R_H inferiore a circa 3 UA in modo da avere una magnitudine tale da essere rilevabili dalla strumentazione e che sia innescata l'evaporazione dei principali elementi volatili³ (par.1.4). Sono preferibili comete dinamicamente nuove, ossia al loro primo passaggio al perielio dato che, avendo subito l'influenza dei raggi solari per molto meno tempo rispetto alle comete periodiche, conservano elementi più incontaminati e di maggiore interesse scientifico.

Il telescopio SOFIA, per quanto riguarda il tracking di oggetti in movimento pone due ulteriori limiti sulla velocità e sulla magnitudine dei target. In particolare si riescono ad effettuare osservazioni su obiettivi con velocità $v < 1$ arcsec/s e magnitudine in banda R $m_R < 10$. Inoltre, il telescopio può osservare su un range di altezze di $23^\circ - 58^\circ$, pertanto

³Ad esempio l'acqua inizia ad evaporare a 2.8 UA

si rivela necessario esaminare le effemeridi delle comete nell'intorno della data di passaggio al perielio per verificare che i loro parametri siano compatibili con i limiti dello strumento⁴. Per il calcolo delle effemeridi si è utilizzato come punto di riferimento il sito di Palmdale, CA (118°07'01.2"W, 34°59'45.2"N), luogo di decollo dell'aereo.

In base alle precedenti considerazioni sono stati selezionati due oggetti compatibili, la cometa iperbolica C/2021 A1 (Leonard) e la cometa a lungo periodo C/2021 O3 (PANSTARRS), di cui si riportano distanze geocentriche minime, data e distanza del passaggio al perielio in Tabella 4.1.

La cometa C/2021 A1 diviene rilevabile alla strumentazione per un massimo di 3 ore dal 29 novembre fino al 10 dicembre 2021, data in cui risulta in opposizione al Sole. Verrebbe pertanto osservata nella sua orbita *inbound* prima del perielio.

La cometa C/2021 O3 invece esce dall'opposizione con il Sole dopo il passaggio al perielio, il 10 maggio 2022 e può essere osservata fino al 1 giugno per un massimo di 9 ore a notte, dopodichè la sua magnitudine supera il valore di $m_R = 10$ e pertanto non può più essere rilevata dalla strumentazione. Da tali considerazioni, grazie all'utilizzo del *visibility tool* di USPOT si sono potute selezionare le finestre temporali migliori per l'osservazione dei target. Si consiglia l'osservazione della cometa C/2021 A1 nella notte del 3 dicembre 2021, nella fascia oraria che va dalle 11:30 UT alle 14:30 UT. La cometa C/2021 O3 invece, la notte del 25 maggio 2022 tra le 3:00 UT e le 7:00 UT. Le effemeridi dei target, calcolate con HORIZON e le curve di visibilità, calcolate con USPOT, sono consultabili in Tabella 4.2 e in Figura 4.1.

Nome	t_p [dd/mm/yyyy]	q [UA]	Δ_{min} [UA]
C/2021 A1	03/01/2022	0.615 ± 0.001	0.234 ± 0.001
C/2021 O3	22/04/2022	0.293 ± 0.004	0.603 ± 0.001

Tabella 4.1: Parametri orbitali di C/2021 O3 e C/2021 A1.

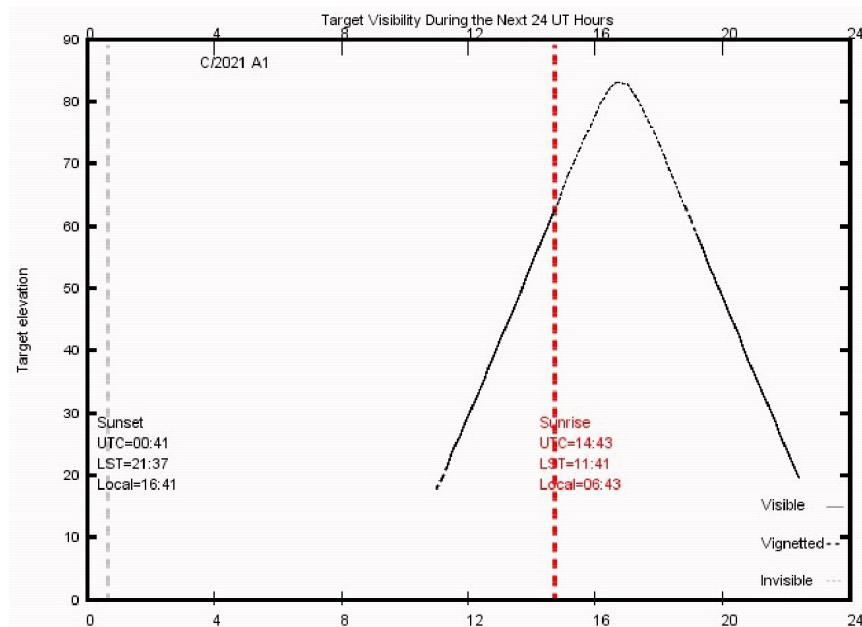
t_p = data del passaggio al perielio

q= distanza del perielio

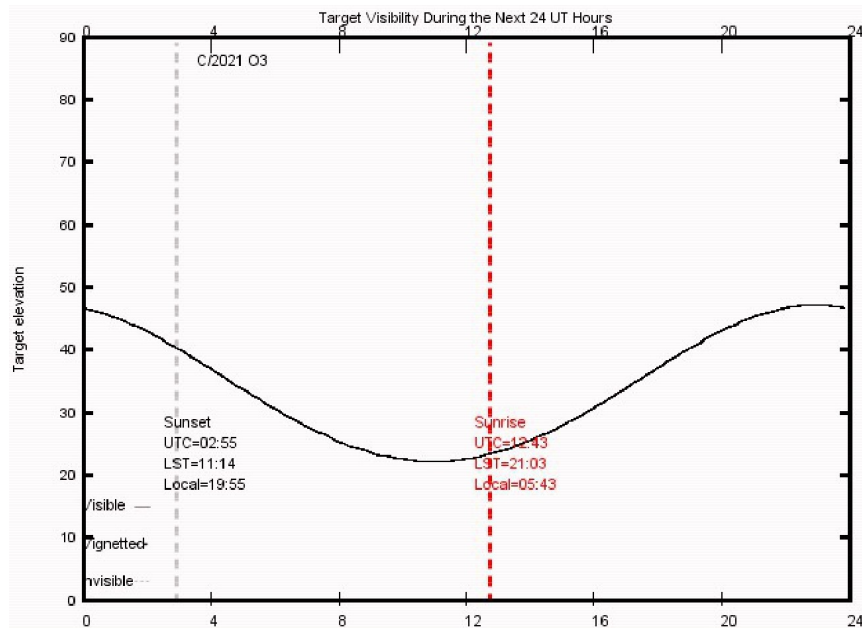
Δ_{min} = distanza geocentrica minima.

Fonte: JPL Small-Body Database Search Engine

⁴Le informazioni strumentali sono state prese dal sito ufficiale della missione: <https://www.sofia.usra.edu/>, mentre le effemeridi delle comete sono state calcolate grazie al tool HORIZON di JPL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>



(a) Curva di visibilità di C/2021 A1 la notte del 3 dicembre 2021



(b) Curva di visibilità di C/2021 O3 la notte del 25 maggio 2022

Figura 4.1: Curve di visibilità dei target calcolate con il software USPOT

4.3 Strategia osservativa

La misura delle righe dell' $H_2^{18}O$ e dell' HDO , rispettivamente a 547.676 GHz e 509.292 GHz verrà effettuata con lo strumento GREAT, che dispone del range di frequenze adatto. Precisamente in configurazione upGREAT HFA/4GREAT nella prima banda di frequenza (4G1), 491 – 635 GHz.

Il calcolo del tempo di esposizione con GREAT viene eseguito grazie a SITE, i cui parametri di input sono stati impostati utilizzando come riferimento l'articolo di Lis et al. (2019 [54]) e facendo alcune considerazioni sulla differenza di luminosità tra la cometa 46P/Wirtanen, da loro osservata, e i target qui proposti. La cometa 46P, osservata con SOFIA tra il 14 e il 20 dicembre 2018, raggiungeva in tali date una magnitudine in banda R pari a circa $m_R \approx 11$. Le comete C/2021 A1 e C/2021 O3, come riportato in Tabella 4.2 sono della 9 magnitudine, quindi risultano circa 6 volte più luminose. Questo influisce ovviamente sulla temperatura di brillantezza T_R^* , uno dei parametri di input necessari al calcolo del tempo di esposizione, che risulterà altrettanto superiore. La temperatura di brillantezza si può ottenere dalla temperatura di *main beam*, utilizzata nell'articolo di riferimento, dalla relazione $T_R^* = T_{mb} \frac{\eta_{MB}}{\eta_{fss}}$ noti i parametri T_{mb} , η_{MB} e η_{fss} , rispettivamente la temperatura di *main beam*, l'efficienza di *main beam* e l'efficienza di *forward scattering*. Per GREAT si ha $\eta_{fss} = 0.97$ e $\eta_{MB} = 0.63$ per il HFA⁵. I valori di T_{MB} riportati per la cometa 46P sono 305 ± 20 mK per l' $H_2^{18}O$ e 27 ± 8.8 mK per l' HDO , circa due ordini di grandezza più debole. Date le precedenti considerazioni vengono stimati rispettivamente $T_R^* \geq 1.19$ K per la riga dell' $H_2^{18}O$ e $T_R^* \geq 0.11$ K per la riga dell' HDO . Dalla referenza sono state prese anche le quantità relative alla risoluzione in frequenza, $\Delta\nu \simeq 0.24$ GHz e alla *linewidth*, $\Delta v \simeq 20$ km/s, mentre da HORIZON si sono consultate le $\dot{\Delta}$, ossia le velocità delle comete, date dal *range rate* apparente del centro del target rispetto all'osservatore; $\dot{\Delta} \simeq -58$ km/s per C/2021 A1 e $\dot{\Delta} \simeq 25$ km/s per C/2021 O3.

Dalle precedenti stime si calcolano dei tempi di esposizione di circa 1.5 h per entrambe le righe: nel caso dell' HDO , molto debole, questo tempo sarà necessario al raggiungimento di $S/N \approx 5$, sufficiente alla stima dell'abbondanza e dunque al calcolo del D/H, mentre per l' $H_2^{18}O$ nel medesimo tempo si ottiene $S/N \approx 30$. Si osserva infine che i tempi di esposizione sono riferiti alla *Upper Sideband* (USB) nella quale risulta una migliore trasmissione atmosferica. Il SITE fornisce anche i grafici di trasmissione atmosferica per ogni riga, che

⁵Fonte: *Observer's Handbook for Cycle 9*, consultabile al link: <https://www.sofia.usra.edu/science/proposing-and-observing/proposal-documents>

Cometa	Orario [UT]	α [hh/mm/ss.ff]	δ [sdd/mn/sc.f]	v [arcsec/s]	m_R
C/2021 A1	11:30	13 45 38.95	+27 57 46.1	0.106	9.159
	12:30	13 46 07.85	+27 55 11.7	0.107	9.151
	13:30	13 46 36.85	+27 52 35.6	0.107	9.142
	14:30	13 47 05.95	+27 49 57.7	0.108	9.133
C/2021 O3	03:00	07 12 29.83	+76 56 05.9	0.061	9.146
	04:00	07 13 34.16	+76 58 31.9	0.061	9.152
	05:00	07 14 38.95	+77 00 56.4	0.061	9.158
	06:00	07 15 44.23	+77 03 19.7	0.061	9.164
	07:00	07 16 49.98	+77 05 41.8	0.062	9.170

Tabella 4.2: Effemeridi delle comete C/2021 A1 e C/2021 O3 per i giorni 03/12/2021 e 25/05/2022, nei quali vengono raggiunte distanze eliocentriche rispettivamente di $R_H = 0.89$ UA e $R_H = 0.91$ UA. I parametri riportati sono, dalla seconda colonna a sinistra: orario in UT per i giorni 03/12/2021 e 25/05/2022; coordinate equatoriali, ascensione retta e declinazione; velocità massima raggiunta dal target, intesa come tasso di variazione della cordinata di ascensione retta $d(\alpha)/dt$; magnitudine in banda R, ottenuta dalla magnitudine in banda V fornita da HORIZON tramite l'indice di colore del Sole $(V-R)_{\odot} = 0.354 \pm 0.005$ (Ramírez et al. 2012 [65])

Fonte: JPL HORIZON

vengono riportati in Figura 4.2.

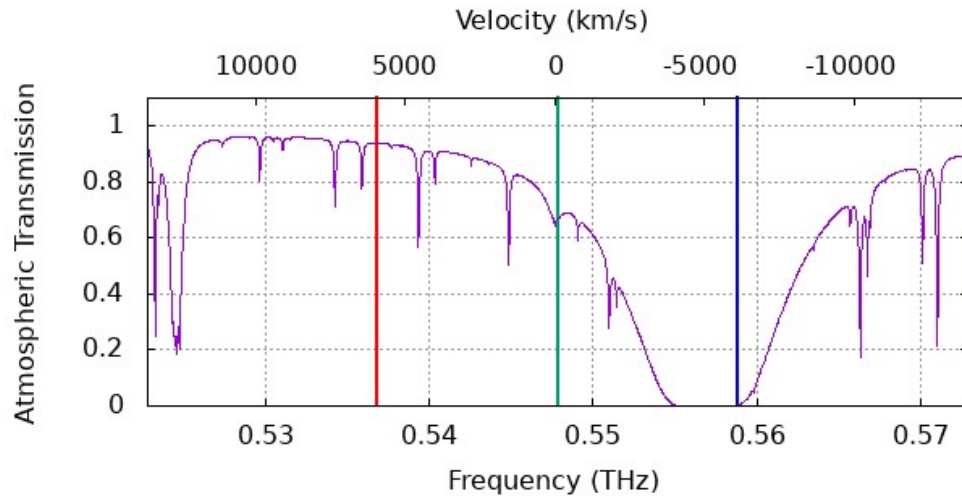
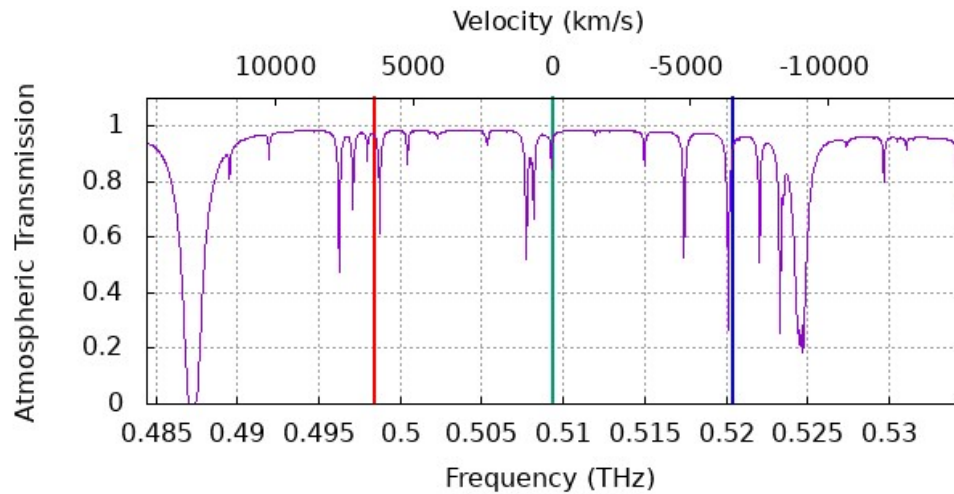
(a) *Grafico di trasmissione per l' $H_2^{18}O$* (b) *Grafico di trasmissione per l' HDO*

Figura 4.2: Grafici di trasmissione atmosferica generati da SITE. La linea verde mostra la posizione della linea nella banda di segnale, la linea rossa mostra dove ricadrebbe la banda immagine se la riga rientrasse nella USB, la linea blu mostra dove ricadrebbe la banda immagine se la riga rientrasse nella LSB.

Conclusioni

Le comete da sempre sono tra i corpi del sistema solare che più hanno attirato l'interesse degli astronomi. Composte tipicamente da roccia, ghiaccio e polveri, in seguito a perturbazioni dinamiche vengono inserite su orbite interne che le conducono nelle vicinanze del Sole. Il calore innesca la sublimazione dei ghiacci e si generano una chioma e una coda di gas; queste componenti, insieme alla polvere che riflette la radiazione solare, aumentano drasticamente la luminosità della cometa, rendendola visibile ai telescopi e permettendo agli astronomi di studiarne la composizione. L'abbondanza degli elementi rilevabili nelle chiome cometarie consente di dedurre un ampio numero di informazioni. In questo elaborato si è approfondita la questione del rapporto D/H, ossia l'abbondanza di deuterio rispetto all'idrogeno. L'abbondanza di deuterio nelle molecole dipende principalmente da una reazione chimica detta *frazionamento*, la quale presenta una dipendenza inversa dalla temperatura. Il meccanismo di frazionamento porta ad un aumento nella deuterazione media delle molecole alle basse temperature, mentre alle alte temperature il rapporto D/H tende a diminuire. Sulla base dell'intuizione si potrebbe affermare che oggetti formatisi vicino al Sole presentino valori del D/H inferiori rispetto ad oggetti nati nelle regioni più esterne, ma i dati smentiscono questa ipotesi: nelle comete, infatti, si rilevano quantità molto varie che prescindono dalla loro famiglia di appartenenza, tra 1 e 3 – 4 volte il valore misurato negli oceani terrestri.

La distribuzione dei valori del D/H nel sistema solare presenta dunque molti aspetti irrisolti. In particolare il dibattito sull'origine dell'acqua terrestre è un argomento tuttora lontano da una soluzione. Secondo il modello standard di formazione planetaria ad oggi più accreditato, la Terra si sarebbe costituita unicamente da planetesimi rocciosi e l'acqua sarebbe giunta in un secondo momento, probabilmente portata da asteroidi e comete in occasione del *Late Heavy Bombardment*. Nonostante sui primi siano stati misurati valori del D/H più compatibili con l'acqua terrestre, un recente studio condotto da Lis et al.

(2019 [54]) potrebbe rivalutare il ruolo delle comete: la pubblicazione mostra una correlazione interessante, tale per cui le poche comete su cui si è misurato un D/H terrestre, 46P/Wirtanen, 103P/Hartley 2 e 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková sembrerebbero mostrare sistematicamente tratti di iperattività. L'iperattività in una cometa denota un'elevata frazione attiva, quindi un tasso di produzione dell'acqua molto alto se confrontato con le dimensioni del nucleo. Per spiegare questa caratteristica è già stato proposto un modello da A'Hearn et al. (2011 [1]) coerente con le osservazioni condotte dalla sonda Deep Impact sulla cometa 103P/Hartley 2. Tuttavia questo modello non spiega perché le comete iperattive presentino un D/H terrestre.

Per questo motivo si è deciso di dare una finalità pratica al presente elaborato, producendo un proposal osservativo per il telescopio stratosferico SOFIA. Si sono selezionati due target, le comete iperboliche C/2021 A1 (Leonard) e C/2021 O3 (PANSTARRS) che presentano parametri orbitali favorevoli alle osservazioni e consistenti con i limiti strumentali del telescopio. SOFIA garantisce grandi vantaggi in termini di assorbimento atmosferico alle frequenze del submillimetrico, banda in cui ricadono le righe dell'acqua necessarie alla misura del D/H, in particolare il ricevitore *heterodyne* GREAT, indicato per le osservazioni. Con il presente proposal si vuole dare uno sviluppo futuro a questa tesi, indicando una tipologia di osservazioni che potrà fornire maggiori dati a sostegno di una teoria promettente, con la potenzialità di chiarire il nesso tra comete e acqua terrestre.

Bibliografia

- [1] A'Hearn, M. F., Feaga, L. M., Sunshine, J. M., Protopapa, S. et al., *EPOXI at comet Hartley 2*, Science 332(6036), 1396-1400 (2011)
- [2] Alexander, C. M. O'D. et al., *The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets*, Science 337(6095), 721-723 (2012)
- [3] Altwegg, K., Combi, M., Eberhardt, P. et al., *67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio*, Science, 347(6220):1261952 (2015)
- [4] Balsiger, H., Altwegg, K., Eberhardt, P. et al., *Rosina, Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis*, Space Sci. Rev. 128(1-4): 745-801 (2007)
- [5] Banwell, C. N., *Fundamentals of molecular spectroscopy*, McGraw-Hill, terza edizione, 1983
- [6] Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Crovisier, J., Lis, D. C. et al., *Isotopic ratios of H, C, N, O, and S in comets C/2012 F6 (Lemmon) and C/2014 Q2 (Lovejoy)*, A&A 589, A78 (2016)
- [7] Blum, J., Fulle, M. et al., *Evidence for the formation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko through gravitational collapse of a bound clump of pebbles*, Mon. Not. Astron. R. Soc. 469, S755-S773 (2017)
- [8] Bockelée-Morvan, D., Lis, D. C., Young, K., Crovisier, J. et al., *Deuterated water in comet C/1996 B2 (Hyakutake) and its implications for the origin of comets*, Icarus 133(1): 147-162 (1998)
- [9] Bockelée-Morvan, D., Crovisier, J., Mumma, M. J. & Weaver, H. A., *The composition of cometary volatiles*, Comets II, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pagg.391-423 (2004)

- [10] Bockelée-Morvan, D. et al., *Cometary isotopic measurements*, Space Sci. Rev., 197: 47-83 (2015)
- [11] Bonev, B. P., Combi, M. R., Biver, N., Cochran, A. L. et al., *First comet observations with NIRSPEC-2 at Keck: outgassing sources of parent volatiles and abundances based on alternative taxonomic compositional baselines in 46P/Wirtanen*, Planet. Sci. J. 2(2):45 (2021)
- [12] Boogert, A. C. A., Gerakines, P. A. & Whittet, D. C. B., *Observations of the icy universe*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 53: 541-581 (2015)
- [13] Bresolin, F., *Astronomical spectroscopy*, Lecture notes, 2018
- [14] Brooke, T. Y. et al., *Spectroscopy of comet Hale-Bopp in the infrared*, Icarus 166: 167-187 (2003)
- [15] Caselli, P. et al., *First detection of water vapor in a pre-stellar core*, Astrophys. J. Lett., 759: L37 (2012)
- [16] Ceccarelli, C. et al., *Extreme deuteration and hot corinos: the earliest chemical signatures of low-mass star formation*, Protostars and Planets V, I: 47-62 (2006)
- [17] Ceccarelli, C., Bockelée-Morvan, D. et al., *Deuterium fractionation: the Ariadne's thread from the pre-collapse phase to meteorites and comets today*, in Protostars and Planets VI, Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, and Thomas Henning (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pagg.859-882 (2014)
- [18] Ciroi, S. & Cracco, V., *Dispense del corso di Laboratorio di astronomia*, a.a. 2014/2015
- [19] Cochran, A. L., Barker, E. S. e Gray, C. L., *Thirty years of cometary spectroscopy from McDonald observatory*, Icarus 218(1):144-168 (2011)
- [20] Cochran, A. L., Nelson, T. & McKay, A. J., *What does it mean to be a "depleted" comet? High spectral resolution observations of the prototypical depleted comet 21P/Giacobini-Zinner from the McDonald observatory*, Planet. Sci. J. 1:71 (2020)
- [21] Combi, M. R., Harris, W. M. & Smyth, W. H., *Gas dynamics and kinetics in the cometary coma: Theory and Observations*, in Comets II, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pagg.523-552 (2004)

- [22] Cooke, R. J., Pettini, M. & Steidel, C. C., *One percent determination of the primordial deuterium abundance*, *Astrophys. J.*, 855(2):102 (2018)
- [23] Crovisier, J., Bockelée-Morvan, D., Encrenaz, T. et al., *The thermal infrared spectra of comets Hale-Bopp and 103P/Hartley 2 observed with the Infrared Space Observatory*, in "Thermal emission spectroscopy and analysis of dust, disks and regoliths", Eds. M. L. Sitko, A. L. Sprague, and D. K. Lynch, *Astronomical Society Pacific Conference series Vol. 196*, pagg. 109-117 (2000)
- [24] Crovisier, J., Bockelée-Morvan, D., Biver, N., Lis, D. C. et al., *The composition of ices in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) from radio spectroscopy*, *A&A* 418, 1141-1157 (2004)
- [25] de Bergh, C., *The D/H ratio and the evolution of water in the terrestrial planets*, *Orig. Life Evol. Biosph.* 23(1):11-21 (1993)
- [26] Dones, L., Levison, H., Duncan, M. & Weissman, P., *Formation of the Oort cloud revisited*, *Bull. Am. Astron. Soc.* 32, 1060 (2000)
- [27] Durán, C. A. et al., *4GREAT—A Four-Color Receiver for High-Resolution Airborne Terahertz Spectroscopy*, *IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol.*, 11(2): 194-204 (2021)
- [28] Eberhardt, P. et al., *The D/H ratio in water from comet P/Halley*, *A&A* 187, 435-437 (1987)
- [29] Encrenaz, T., *Water in the solar system*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 46: 57-87 (2008)
- [30] Etim, E. E. et al., *Deuterated interstellar and circumstellar molecules: D/H ratio and dominant formation processes*, *Indian J. Phys.*, 95(5): 779-795 (2021)
- [31] Feldman, P. D., Cochran, A. L. & Combi, M. R., *Spectroscopic investigations of fragment species in the coma*, *Comets II*, M. C. Festou, H. U. Keller, and H. A. Weaver (eds.), *University of Arizona Press, Tucson*, pagg.425-447 (2004)
- [32] Feldman, P. D., A'Hearn, M. F., Feaga, L. M. et al., *Measurements of the near-nucleus coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko with the Alice far-ultraviolet spectrograph on Rosetta*, *A&A* 585, A8 (2015)

- [33] Fulle, M., Blum, J. e Rotundi, A., *How comets work*, *Astrophys. J. Lett.* 879: L8 (2019)
- [34] Fulle, M., *Water and deuterium-to-hydrogen ratio in comets*, *Mon. Not R. Astron. Soc.* 505, 3107-3112 (2021)
- [35] Gehrz, R. D., Herter, T., Krabbe, A. et al., *Status of the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA)*, *Advances in space research*, 48(6):1004-1016 (2011)
- [36] Geiss, J. & Gloecker, G., *Abundance of deuterium and helium-3 in the protosolar cloud*, *Space Sci. Rev.* 84: 239-250 (1998)
- [37] Greenberg, J. M. e Li, A., *Morphological structure and chemical composition of cometary nuclei and dust*, *Space Sci. Rev.* 90:149-161 (1999)
- [38] Hallis, L. J., *D/H ratios of the inner Solar System*, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 375(2094): 20150390 (2017)
- [39] Hartogh, P., Lis, D. C., Bockelée-Morvan, D., Biver, N., Crovisier, J. et al., *Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2*, *Nature* 478, 218-220 (2011)
- [40] Herter, T. L., Adams, J. D. et al., *The FORCAST mid-infrared facility instrument and in-flight performance on SOFIA*, *Proc. SPIE* 8446, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 844616 (2012)
- [41] Heyminck, S., Hartogh, P. et al., *GREAT: the SOFIA high-frequency heterodyne instrument*, *A&A* 552, L1 (2012)
- [42] Hollenbach, D., Kaufman, M. J., Bergin, E. A. & Melnick, G. J., *Water, O₂ and Ice in Molecular Clouds*, *Astrophys. J.* 690: 1497-1521 (2009)
- [43] Hyland, M. G., Fitzsimmons, A. & Snodgrass, C., *Near-UV and optical spectroscopy of comets using the ISIS spectrograph on the WHT*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 484, 1347-1358 (2019)
- [44] Jenniskens, P. & Blake, D. F., *Crystallization of amorphous water ice in the solar system*, *Astrophys. J.* 473: 1104-1113 (1996)
- [45] Jensen, S. S. et al, *ALMA observations of doubly deuterated water: Inheritance of water from the prestellar environment*, *A&A* 650, A172 (2021)

- [46] Kalvans, J. & Shmeld, I., *Subsurface chemistry of mantles of interstellar dust grains in dark molecular cores*, A&A 521, A37 (2010)
- [47] Krabbe, A., Mehlert, D., Röser, H. & Scorza C., *SOFIA, an airborne observatory for infrared astronomy*, Eur. J. Phys. 34: S161-S177 (2013)
- [48] Kulczak-Jastrzebska, M., *Analysis of low excitation HDO transitions toward the high-mass star-forming regions G34.26+0.15, W51e₁/e₂, and W49N*, Astrophys. J. 835, 121 (2017)
- [49] La Forgia, F., Lazzarin, M., A'Hearn, M. F., Fulle, M., Marzari, F. et al., *Geomorphology and spectrophotometry of Philae's landing site on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*, A&A 583, A41 (2015)
- [50] Lazzarin, M., *Dispense del corso di Astrofisica del sistema solare*, a.a. 2018/2019
- [51] Lécuyer, C., Robert, F. et al., *D/H fractionation during the sublimation of water ice*, Icarus 285: 1-7 (2017)
- [52] Levison, F. H., Duncan, M. J., Brassier, R. & Kauffmann, D. E., *Capture of the Sun's Oort cloud from stars in its birth cluster*, Science 329(5988): 187-190 (2010)
- [53] Lis, D. C., Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Hartogh, P. et al., *A Hershel study of D/H in water in the Jupiter-family comet 45P/Honda-Mrkos-Padjusáková and prospects for D/H measurements with CCAT*, Astrophys. J. Lett. 774: L3 (2013)
- [54] Lis, D. C., Bockelée-Morvan, D., Biver, N. et al., *Terrestrial deuterium-to-hydrogen ratio in water in hyperactive comets*, A&A 625, L5 (2019)
- [55] Lunine, J. I., *Origin of water in the solar system*, Meteorites and the Early Solar System II, D. S. Lauretta and H. Y. McSween Jr. (eds.), University of Arizona Press, Tucson, pagg.309-319 (2006)
- [56] Massironi, M., Marzari, F., Sierks, H., Barbieri, C., A'Hearn, M. F., La Forgia, F., Lazzarin, M. et al., *Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P*, Nature 526, 402-405 (2015)
- [57] Mayyasi, M., Clarke, J., Combi, M. et al., *Ly α Observations of comet C/2013 A1 (Siding Spring) using MAVEN IUVS echelle*, Astron. J., 160:10 (2020)

- [58] Milani, A., di Martino, M. e Cellino, A., *Asteroids, comets, meteors 1993: proceedings of the 160th symposium of the international astronomical union, held in Belgirate, Italy, June 14-18, 1993*, Kluwer Academic, 1994
- [59] Moores, J. E., Brown, R. H., Lauretta, D. S. & Smith, P. H., *Experimental and theoretical simulation of sublimating dusty water ice with implications for D/H ratios of water ice on Comets and Mars*, Planet. Sci. 1:2 (2012)
- [60] Ortolani, S., *Dispense del corso di Astronomia 2*, a.a. 2019/2020
- [61] Paganini, L., Mumma, M. J., Gibb, E. L., Villanueva, G. L., *Ground-based detection of deuterated water in comet C/2014 Q2 (Lovejoy) at IR wavelengths*, Astrophys. J. Lett., 836: L25 (2017)
- [62] Paquette, J. A. et al., *D/H in the refractory organics of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by Rosetta/COSIMA*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 505, 4940-4951 (2021)
- [63] Pierce, D. M., Cochran, A. L., *Examination of fragment species in the comae of several comets using an integral field unit spectrograph*, Planet. Sci. J. 2:19 (2021)
- [64] Quénard, D., Ceccarelli, C. et al., *Detectability of deuterated water in prestellar cores*, A&A 585, A36 (2016)
- [65] Ramirez, I., Michel, R., Sefako, R. et al., *The $UBV(RI)_C$ colors of the Sun*, Astrophys. J. 752(1): 5 (2012)
- [66] Rawlings, J. M. C. & Williams, D. A., *Water ice deposition and growth in molecular clouds*, Mon. Not. R. Astron. Soc. 500(4), 5117-5128 (2020)
- [67] Reinhard, R., *The Giotto encounter with comet Halley*, Nature 321, 313-318 (1986)
- [68] Riemer-Sørensen, S. & Jenssen, E. S., *Nucleosynthesis predictions and high-precision deuterium measurements*, Universe 3(2), 44 (2017)
- [69] Risacher, C. et al., *The upGREAT dual frequency heterodyne arrays for SOFIA*, Journal of Astronomical Instrumentation, 7(4):1840014 (2018)
- [70] Robert, F., *The D/H ratio in chondrites*, Space Sci. Rev., 106: 87-101 (2003)

- [71] Saki, M., Bonev, B. P., McKay, A. J. et al., *Carbonyl sulfide (OCS): detections in comets C/2002 T7 (LINEAR), C/2015 ER61 (PanSTARRS), and 21P/Giacobini-Zinner and stringent upper Limits in 46P/Wirtanen*, *Astron. J.*, 160:184 (2020)
- [72] Schroeder, I. R. H. G., Altwegg, K., Combi, M. R. et al., *A comparison between the two lobes of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko based on D/H ratios in H₂O measured with the Rosetta/ROSINA DFMS*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 489, 4734-4740 (2019)
- [73] Shinnaka, Y., Kawakita, H. & Tajitsu, A., *High-resolution optical spectroscopic observations of comet 21P/Giacobini-Zinner in its 2018 apparition*, *Astron. J.*, 159:203 (2020)
- [74] Sierks, H., A'Hearn, M. F., Fulle, M., La Forgia, F., Lazzarin, M., Marzari, F. et al., *On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko*, *Science* 347, 6220 (2015)
- [75] Sitko, M. L. et al., *Infrared spectroscopy of comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 using the Spitzer Space Telescope*, *Astron. J.* 142: 80 (2011)
- [76] Sunshine, J. M. & Feaga, L. M., *All comets are somewhat hyperactive and the implications thereof*, *Planet. Sci. J.* 2:92
- [77] Tennyson, J. et al., *A high accuracy computed line list for the HDO molecule*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 402, 492-496 (2010)
- [78] Walsh, K. J. et al., *A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration*, *Nature* 475, 206-209 (2011)
- [79] Walsh, K. J. et al., *Water delivery and giant impacts in the 'Grand Tack' scenario*, *Icarus* 239, 74-84 (2014)
- [80] Woodward, C. E., Sitko, M. L., Gehrz, R. D. et al., *SOFIA infrared spectrophotometry of comet C/2012 K1 (Pan-STARRS)*, *Astrophys. J.* 809(2): 181 (2015)
- [81] Woodward, C. E. et al., *The coma dust of comet C/2013 US₁₀ (Catalina) - a window into carbon in the solar system*, *Planet. Sci. J.* 2: 25 (2021)
- [82] Yao, Y., Giapis, K. P., *Dynamic deuterium enrichment in cometary water via Eley-Rideal reactions*, *Astrophys. J.*, 835(1): 67 (2017)

- [83] Young, E. T., Herter, T. L., Gehrz, R. D., Krabbe, A. et al., *Early science with SOFIA, the stratospheric observatory for infrared astronomy*, *Astrophys. J. Lett.* 749: L17 (2012)
- [84] Zheng, W., Jewitt, D. & Kaiser, R. I., *Infrared spectra of ammonia-water ices*, *Astrophys. J. Supp.* 181(1): 53-61 (2009)
- [85] Zheng, W., Jewitt, D. & Kaiser, R. I., *On the state of water ice on Saturn's moon Titan and implications to icy bodies in the outer solar system*, *J. Phys. Chem.* 113(42): 11174-11181 (2009)
- [86] Zwart, S. P., Torres, S., Cai, M. X. & Brown, A. G. A., *Oort cloud Ecology II: The chronology of the formation of the Oort cloud*, *A&A* 652: A144 (2021)