



**Università degli Studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

TESI DI LAUREA

**Analisi spettroscopica  
della prima cometa interstellare  
2I/Borisov**

Relatore:

**Prof.ssa Monica Lazzarin**

Laureando:

**Stefano De Roia**

Correlatore:

**Dott.ssa Fiorangela La Forgia**

---

Anno Accademico 2019/2020



*A Franco Balliana*



## Sommario

La scoperta del passaggio di oggetti interstellari attraverso il Sistema Solare ci permette di poter studiare processi chimici e fisici in corpi sconosciuti. Lo studio di questi corpi permette anche di investigare le condizioni di formazione nel loro luogo d'origine e di formulare ipotesi sui processi che hanno portato alla loro dispersione nel mezzo interstellare.

2I/Borisov è la prima cometa interstellare ad essere stata osservata. Scoperta il 30 Agosto 2019 da Genady Borisov, questa cometa è già stata oggetto di numerosi studi che ne hanno delineato delle prime proprietà. Lo scopo di questa tesi è quello di fornire un'analisi spettroscopica preliminare di 2I/Borisov e di sperimentare alcune tecniche di riduzione degli spettri.

Nel capitolo 1 vengono descritte le proprietà fisiche e chimiche finora conosciute delle comete appartenenti al Sistema Solare. Vengono descritte anche le varie classificazioni dinamiche. Nel capitolo 2 si riassumono le principali scoperte sulla cometa interstellare 2I/Borisov, già pubblicate in numerosi articoli. Nel terzo capitolo si descrivono i passaggi effettuati nell'analisi spettroscopica che portano ad una discussione finale dei risultati.



# Indice

<b>1</b>	<b>Le comete</b>	<b>13</b>
1.1	Classificazione dinamica . . . . .	14
1.2	Proprietà fisiche . . . . .	16
1.3	Spettri cometari . . . . .	22
<b>2</b>	<b>La cometa interstellare 2I/Borisov</b>	<b>25</b>
2.1	Caratterizzazioni iniziali della cometa interstellare 2I/Borisov . . . . .	25
2.2	Composizione chimica . . . . .	26
2.3	Ricerca di un luogo d'origine per 2I/Borisov . . . . .	29
2.4	Previsioni per il periodo post perielio . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Analisi spettroscopica</b>	<b>33</b>
3.1	Sottrazione del bias . . . . .	34
3.2	Correzione per flat-field . . . . .	35
3.3	Calibrazione in lunghezza d'onda . . . . .	36
3.4	Sottrazione del cielo . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Discussione dei risultati e conclusioni</b>	<b>41</b>





# Elenco delle figure

1.1	Cintura di Kuiper e nube di Oort . . . . .	13
1.2	Orbite tipiche delle comete a lungo e corto periodo . . . . .	14
1.3	Nomenclatura delle comete. Oltre alla lettera vengono assegnati un nome e un numero basato sull'ordine di scoperta all'interno dell'anno corrente . . . . .	16
1.4	Formazione del mantello di irradiazione (in alto) e del mantello roccioso (in basso) (Orofino et al. 2011) . . . . .	18
1.5	Onda d'urto "di prua" . . . . .	20
1.6	I due principali tipi di code cometarie: la coda di ioni (blu) e la coda di polvere (gialla) . . .	21
1.7	Esempio di spettro della cometa C/2001 A2 Linear . . . . .	24
2.1	Immagine della cometa 2I/Borisov presa da HST . . . . .	25
2.2	Rapporto dei tassi di produzione di $C_2$ e CN . . . . .	27
2.3	Riga del CN a 3880 Å nello spettro di 2I/Borisov . . . . .	28
2.4	Orbita di 2I/Borisov nel Sistema Solare . . . . .	29
3.1	Strumento AFOSC montato sul telescopio Copernico di Asiago (a) e immagine dello spettro della cometa AF575936 (b) . . . . .	33
3.2	Bias medio . . . . .	35
3.3	Immagine scientifica ruotata correttamente con bias sottratto . . . . .	35
3.4	Flat normalizzato (a) e immagine scientifica corretta anche per flat field (b) . . . . .	36
3.5	Spettro monodimensionale della lampada al Neon . . . . .	36
3.6	Profilo pseudogaussiano dello spettro selezionato lungo l'asse della dispersione . . . . .	37
3.7	Contributo del cielo . . . . .	37
3.8	(a) Spettro monodimensionale della cometa 2I/Borisov; (b) spettro della cometa 2I/Borisov a cui è stato sottratto il cielo shiftato . . . . .	38
3.9	Spettro di 2I/Borisov calibrato in lunghezza d'onda e tagliato tra 5000 e 8000 Å senza aver effettuato lo smoothing . . . . .	39
3.10	Spettro finale della cometa 2I/Borisov tra 5000 e 8000 Å . . . . .	39



# Elenco delle tabelle

3.1	Dati principali di tutte le immagini . . . . .	34
3.2	Conteggi dei bias . . . . .	34



# Capitolo 1

## Le comete

Nel Sistema Solare si possono trovare oggetti di grandi dimensioni quali pianeti e Sole. Oltre a questi si hanno anche i cosiddetti corpi minori, oggetti di piccole dimensioni ma che rivestono una notevole importanza per i nostri studi. Infatti, essendo gli oggetti più primitivi del Sistema Solare, ci permettono di studiarne le fasi primordiali di formazione ed evoluzione. I piccoli corpi, inoltre, ci consentono di analizzare proprietà del Sistema Solare quali la sua evoluzione termica o dinamica, il vento solare, la forte craterizzazione dei pianeti interni o ancora la presenza di molecole organiche. Le comete sono classificate proprio come corpi minori insieme a meteoriti, asteroidi, centauro trans-nettuniani e oggetti di transizione.

Le comete sono probabilmente il materiale rimanente delle prime fasi di formazione del Sistema Solare (circa 4.6 miliardi di anni fa). Tale materiale doveva essere concentrato nella parte esterna della nebulosa solare, cioè circa tra le attuali posizioni di Urano e Nettuno (tra 19 e 30  $AU$ ), dove le temperature erano sufficientemente basse per permettere la condensazione degli elementi volatili. Al giorno d'oggi ci sono due zone dove sono concentrate le comete formatesi proprio dal materiale presente nella parte esterna della nebulosa solare: la cintura di Kuiper e la nube di Oort. La prima è una fascia che si estende dopo l'orbita di Nettuno (tra 30 e probabilmente 40 – 50  $AU$ ) mentre la seconda ha una forma sferica e si trova tra le  $10^4$  e le  $10^5$   $AU$ . La formazione di queste zone (e quindi delle due classi di protocomete) è spiegata dal Modello di Nizza<sup>1</sup> che prende in considerazione le migrazioni e le risonanze dei pianeti giganti gassosi in seguito alla dissipazione del disco protoplanetario.

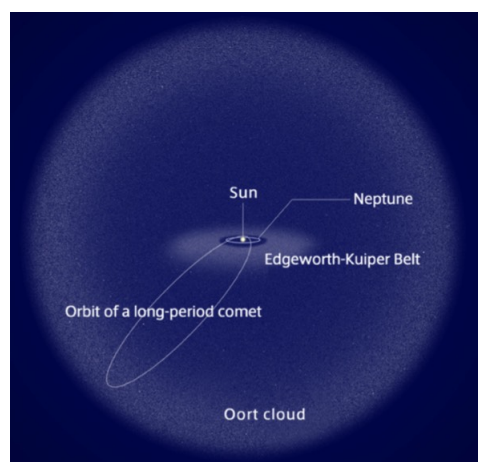


Figura 1.1: Cintura di Kuiper e nube di Oort

---

<sup>1</sup> Il Modello di Nizza è il modello fisico che simula l'evoluzione dinamica del sistema solare nelle fasi successive alla sua formazione. Il modello propone che i quattro giganti gassosi siano migrati verso le attuali orbite partendo da una configurazione orbitale più compatta e vicina al Sole. Secondo il modello, la migrazione dei pianeti più esterni e le interazioni con Giove costrinsero molti planetesimi (di ghiaccio e silicati) a trasferirsi dalla cintura in cui si trovavano (fino a 35  $AU$ ) per andare a formare la nube di Oort. Gli oggetti vincolati da Nettuno andarono, invece, a costituire l'attuale cintura di Kuiper.

Le comete sono piccoli corpi il cui nucleo, che solitamente non raggiunge dimensioni di 50 km, è composto principalmente da ghiacci, specialmente ghiacci d'acqua, rocce e polveri. Il ghiaccio d'acqua non è comunque l'unica specie individuabile nelle comete: si possono trovare anche ghiacci di ammoniaca, metano e numerosi altri tipi.

## 1.1 Classificazione dinamica

Una prima classificazione delle comete si basa sul loro periodo orbitale. Vi si distinguono le comete a corto periodo, con un periodo orbitale inferiore ai 200 anni, e quelle a lungo periodo, con un periodo orbitale superiore a quello delle comete a corto periodo.

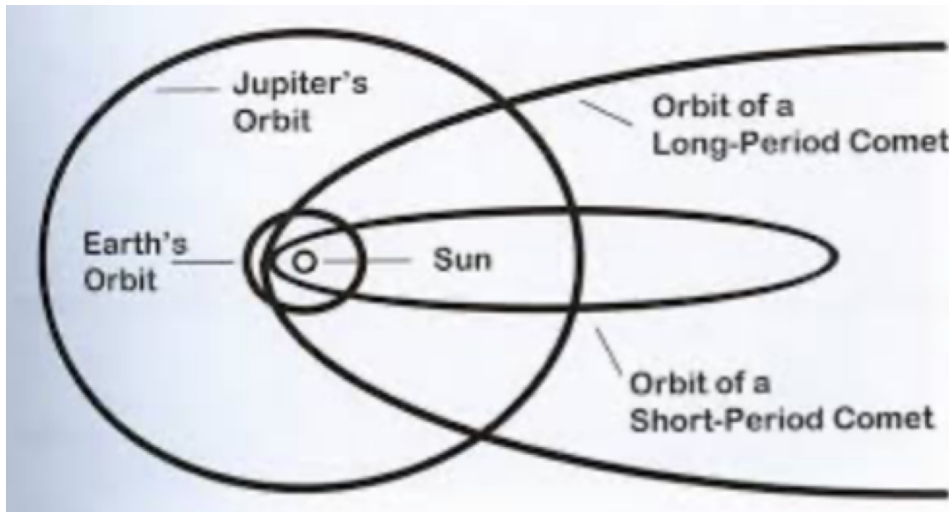


Figura 1.2: Orbite tipiche delle comete a lungo e corto periodo

Tra le comete a corto periodo, circa il 60% ha un periodo orbitale compreso tra i 5 e i 6.5 anni. Le orbite sono ellittiche e tipicamente prograde (solo il 7% ha orbite retrograde) con inclinazioni molto basse, raggruppate attorno al piano equatoriale. Queste inclinazioni sono spiegate con un'origine dalla cintura di Kuiper, la cui esistenza è stata postulata da Edgeworth (1949) e Kuiper (1951). L'afelio tipico di queste comete è circa 40-70 AU.

Le comete a corto periodo possono essere suddivise in altre due classi: *le comete della famiglia di Giove* e *le comete di tipo Halley*. Le prime devono il loro nome al fatto che hanno l'afelio vicino all'orbita del pianeta e sono dinamicamente soggette al suo controllo. Inoltre hanno un periodo orbitale < 20 anni, descrivono orbite prograde e poco eccentriche con basse inclinazioni e hanno semiassi maggiori compresi tra 3 e 4 AU. I nuclei delle comete gioviane, che hanno diametri inferiori ai 10 km, hanno un periodo di rotazione inferiore alle 10 ore. Solamente una piccola parte della superficie del nucleo cometario è attiva. Al mese di luglio del 2019 si conoscono circa 585 comete appartenenti a questa famiglia.

Le comete di tipo Halley hanno periodi che variano tra i 20 e i 200 anni, inclinazioni più elevate (0°-90° circa) sul piano equatoriale e afeli che possono andare dall'orbita di Giove fino a oltre quella di Nettuno. Tra di esse si possono trovare anche comete con orbite retrograde.

Le comete a lungo periodo mostrano periodi che superano i 200 ma che possono raggiungere anche i  $10^7$  anni tanto che alcune di esse potrebbero non essere state ancora viste due volte. Le loro orbite sono, infatti, molto eccentriche con inclinazioni casuali e il moto spesso retrogrado. L'elevate eccentricità e la grande varietà di inclinazioni derivano dal fatto che questa classe di comete dovrebbe provenire da una nube cometaria sferica (teorizzata da Oort nel 1950) situata tra  $10^4$  e  $10^5$  AU e contenente circa  $10^{12}$  oggetti che vengono immessi nel Sistema Solare interno probabilmente in seguito al passaggio ravvicinato di una stella che ne modifica l'orbita.

Le comete a lungo periodo si dividono ulteriormente in due gruppi: le *new comet* e le *returning comet*. Tale suddivisione si basa sul valore assunto dal semi-asse maggiore, > 10000 AU per le prime e minore per le seconde. Inoltre si ritiene che le *returning comet* siano state in precedenza delle *new comet*. Questo

perché ad ogni passaggio al perielio il valore del semiasse maggiore dell'orbita dovrebbe leggermente diminuire a causa dell'attrazione esercitata dal Sole.

Una più recente classificazione dinamica delle comete è stata ideata da Francois Felix Tisserand che ha cercato un'espressione matematica invariante che descrivesse una cometa periodica durante tutti i suoi passaggi. Le comete periodiche, infatti, mutano i propri parametri orbitali in seguito al primo passaggio a causa della perdita di massa del nucleo cometario e delle perturbazioni esercitate su di esse da parte dei pianeti. Poiché tali perturbazioni sono dovute principalmente a Giove, l'*invariante di Tisserand* è il risultato dello studio di un problema a tre corpi (Sole, Giove e cometa) considerando però la massa della cometa trascurabile e l'eccentricità di Giove nulla. L'espressione dell'invariante è:

$$\frac{a_j}{a} + 2\sqrt{\frac{a(1-e^2)}{a_j}} \cos(i) = T_j \quad (1.1)$$

dove  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita della cometa,  $a_j$  di Giove,  $e$  l'eccentricità,  $i$  l'inclinazione dell'orbita della cometa sul piano dell'eclittica. Tale espressione ci fornisce quindi un test per verificare che oggetti visti in due successive apparizioni siano effettivamente la stessa cometa.

L'invariante di Tisserand permette una suddivisione delle comete a seconda del valore assunto. Infatti per  $T > 2$  abbiamo le *comete eclittiche* con basse inclinazioni, mentre per  $T < 2$  le *comete quasi isotropiche* che hanno un vasto range di inclinazioni.

Le prime si dividono ulteriormente in tre gruppi: la famiglia di Giove ( $2 < T < 3$ ) chiamata così perché dinamicamente sotto il controllo del pianeta, le comete tipo Encke ( $T > 3$  e  $a < a_j$ ) con orbite interne a quella del gigante gassoso e di tipo Chirone ( $T > 3$  e  $a > a_j$ ) con orbite esterne. Si pensa che queste comete provengano dalla cintura di Kuiper e dal Disco Scatterato.

Anche le comete quasi isotropiche si dividono in altri due gruppi: le *new comet* con semiasse maggiori  $a > 10000 AU$  e le *returning comet* con  $a < 10000 AU$ . Queste ultime possono essere *external* con  $a > 40 AU$  oppure *del tipo di Halley* con  $a < 40 AU$ , le quali dovrebbero provenire, come le comete a lungo periodo, dalla nube di Oort.

Una volta immesse nel Sistema Solare, le comete seguono la loro orbita nei successivi passaggi con la possibilità di disgregarsi a causa della forza mareale esercitata dal Sole. Inoltre più a lungo orbitano nel Sistema Solare e più interagiscono con i pianeti stessi potendo quindi andare a modificare la propria orbita. Può anche capitare che finiscano col collidere con un pianeta del quale intersecano l'orbita (Shoemaker-Levy 9).

Si pensa che le comete abbiano una composizione di volatili primitiva che dovrebbe riflettere le condizioni del disco protosolare nella loro regione di formazione. Esiste quindi la possibilità che ci siano delle comete, che possono essere espulse dal proprio sistema stellare grazie all'interazione con pianeti giganti, con una composizione chimica legata al loro luogo d'origine. Questo ci porta a definire una nuova classe di comete: le *comete interstellari*. Esse si trovano nel mezzo interstellare e non sono legate gravitazionalmente ad alcuna stella. Le comete interstellari possono penetrare nel Sistema Solare probabilmente a causa della perturbazione subita dal passaggio ravvicinato di una stella e solamente quando ciò avviene le si può identificare. Questi oggetti sono caratterizzati da traiettorie fortemente iperboliche con velocità elevate non attribuibili a comete provenienti dalla nube di Oort. Uno studio (Higuchi & Kokubo et al. 2019) ha posto una divisione probabilistica tra le comete provenienti dalla nube di Oort e quelle interstellari. La probabilità che la cometa in esame rientri nella prima classe aumenta al diminuire dell'eccentricità e all'aumentare del perielio. Al contrario la probabilità di avere a che fare con una cometa interstellare aumenta al diminuire sia dell'eccentricità che del perielio. Potrebbe capitare, però, che il passaggio ravvicinato di una stella vada a modificare l'orbita di una cometa della nube di Oort rendendola altamente iperbolica. Per questo, in alcuni casi, le caratteristiche dinamiche non sono prove sufficienti per spiegare l'origine di una cometa interstellare nonostante si ritenga sulla base dei modelli standard di formazione dei sistemi planetari che essa sia dovuta all'espulsione dei planetesimi da tali sistemi a causa dell'interazione con esopianeti giganti.

<i>Tipologia comete</i>	<i>Simbolo</i>
<i>Periodiche</i>	<i>P</i>
<i>Non periodiche</i>	<i>C</i>
<i>Perdute</i>	<i>D</i>
<i>Divenute asteroidi</i>	<i>A</i>
<i>Comete di cui non è possibile calcolare l'orbita</i>	<i>X</i>

Figura 1.3: Nomenclatura delle comete. Oltre alla lettera vengono assegnati un nome e un numero basato sull'ordine di scoperta all'interno dell'anno corrente

## 1.2 Proprietà fisiche

Come già detto nel capitolo 1, le comete sono piccoli oggetti fatti di rocce e ghiacci i cui nuclei hanno dimensioni che solitamente non superano i 50 km. A distanze maggiori di 5 – 6 AU, lontano dal perielio, il nucleo non presenta ancora la chioma e le code. Questo implica che la luminosità sia dovuta esclusivamente alla luce solare riflessa e che, quindi, la cometa abbia un aspetto tipicamente asteroidale. Man mano che la cometa si avvicina al perielio, i ghiacci iniziano a riscaldarsi. Così facendo i materiali volatili sublimano e si ha la fuoriuscita del gas con la conseguente formazione di un'atmosfera sferica che circonda il nucleo e prende il nome di *chioma*. Allo stesso tempo la radiazione e il vento solare iniziano ad interagire con la chioma stessa andando a formare le *code*. La chioma e le code sono delle caratteristiche transitorie che si presentano poco prima del passaggio al perielio. Pertanto in loro presenza la cometa viene detta *attiva*. Inoltre, quando la cometa è attiva, la luminosità è molto maggiore rispetto a quella del solo nucleo non essendo dovuta solamente alla luce solare riflessa. La distanza dal Sole, quindi, influisce molto sulle proprietà fisiche e l'aspetto delle comete.

### Il nucleo

Il nucleo cometario è all'origine di tutti i fenomeni delle comete. Esso è una struttura solida che permane per tutto il moto di rivoluzione di una cometa e che fino a poco tempo fa è stato difficilmente osservabile direttamente. Il nucleo è visto come una "palla di neve" contenente una notevole quantità di polveri, variabile da cometa a cometa. Questo modello prende il nome di "*dirty snowball*" e fu teorizzato da Fred Whipple nel 1950 dall'analisi delle temperature di fusione ed ebollizione delle molecole ritenute responsabili della formazione della chioma. Tale modello spiega anche che polveri e ghiacci, non solo d'acqua ma anche di anidride carbonica e altri composti, sono presenti più o meno nella stessa percentuale. Questa descrizione dei nuclei cometari, confermata dalle osservazioni della cometa Halley, riesce a spiegare diversi risultati osservativi, per esempio la quantità di molecole prodotte dai ghiacci che comporta un periodo di attività cometaria più lungo, incompatibili con modelli precedenti ritenuti validi fino al 1950. Come scrive Elidoro et al. (1996), il modello di Whipple supera anche i problemi delle comete "sun-grazing", le quali non si disintegrano del tutto passando vicinissimo al Sole, della presenza di comete periodiche, che col modello dei sandbanks non potrebbero giustificare il rimpiazzo del materiale disperso in seguito alla sublimazione, e di un moto cometario anche non gravitazionale che permetta di anticipare o ritardare il passaggio al perielio. Con il modello di Whipple viene spiegato che un corpo compatto che passa vicino al Sole può fratturarsi ma si volatilizza solamente un piccolo guscio esterno. La massa di un nucleo compatto composto principalmente di ghiacci, inoltre, rende possibile il passaggio periodico delle comete e il moto "non gravitazionale" si spiega con la forza di reazione che segue all'espulsione di gas (effetto razzo). Tra i modelli non compatibili troviamo per esempio il modello dei "*sandbanks*" (un insieme di particelle solide molto porose con orbite molto simili attorno al Sole legate dalla gravità e che liberano il gas molecolare che contengono originando la chioma) proposto da Levin nel 1943, dei



"*rubble pile*" (frammenti debolmente legati con dimensioni dai centimetri a centinaia di metri con il nucleo circondato da detriti orbitanti) o "*ice-glue*" (100 m di blocchi porosi incollati da una matrice di ghiaccio e polvere).

La superficie presenta molte caratteristiche tra le quali colline, valli e crateri. Per quanto riguarda la struttura interna del nucleo, non sembra esserci una stratificazione come quella dei pianeti che si rifletta, poi, sulle differenze fra comete a lungo e a corto periodo. Infatti la composizione di una cometa sembra rimanere la stessa nel tempo con gli strati più interni che contengono le stesse molecole, rendendo gli spettri di emissione simili tra loro. Quando la cometa si avvicina al perielio (Elidoro et al. 1996), l'irraggiamento solare alza la temperatura superficiale delle zone esposte. L'elevata porosità del materiale meteorico presente, però, fa sì che ci sia una bassissima conduttività termica che limita la trasmissione del calore. Questa, unita al fatto che l'energia ricevuta viene impiegata per la sublimazione dei ghiacci, porta la parte più interna del nucleo ad essere sempre estremamente fredda. Sembrano non esserci differenze radiali neanche tra comete poco e molto evolute in quanto il rapporto polvere-gas non varia con la profondità del nucleo.

I nuclei cometari possono avere svariate dimensioni, misurate tramite fotometria quando la cometa è molto distante dal Sole, tipicamente comprese tra le centinaia di metri e le decine di chilometri. Da questo punto di vista sembra esserci una divisione statistica tra le comete a corto e lungo periodo. Le prime hanno generalmente dimensioni dell'ordine del chilometro mentre le seconde arrivano anche a 5 – 10 km. Questo non esclude, però, che ci siano anche comete appartenenti a una delle due classi con dimensioni differenti da quelle citate prima.

Parlando, invece, della forma dei nuclei cometari, possiamo notare come la maggior parte di questi oggetti abbia una struttura triassiale lontana dalla sfericità con rapporti tra gli assi di 2 : 1 : 1. La forma è in parte responsabile anche del periodo di rotazione assiale del nucleo, il quale è compreso tra le 4 e le 70 ore (Lang et al. 1992) e che non tende mai ad essere molto più piccolo di 10 ore. Esso viene misurato dalle variazioni della curva di luce del nucleo ed è in parte responsabile della frazione di superficie attiva che determina il moto "non gravitazionale". Se il periodo di rotazione fosse molto minore dei valori prima citati, ci sarebbe uno squilibrio tra forza gravitazionale e centrifuga che porterebbe all'instabilità gravitazionale del nucleo (Jewitt e Meech et al. 1988). Tale instabilità può essere intesa come una densità critica di  $0.3 \text{ g/cm}^3$  al di sotto della quale il nucleo non è stabile (Jewitt e Luu et al. 1989). Con densità di poco superiori, circa  $1 \text{ g/cm}^3$ , si stimano masse cometarie tra  $10^{12}$  e  $10^{19}$  kg.

Quando la radiazione solare colpisce la superficie, una parte dell'energia viene assorbita e l'altra riflessa a seconda dell'albedo. L'albedo dei nuclei cometari è una quantità difficilmente calcolabile. Per esso si assumono valori compresi tra quelli del ghiaccio d'acqua e dei corpi più scuri del Sistema Solare. La maggior parte dei nuclei cometari mostra, infatti, valori dell'albedo visuale molto minori rispetto a quelli del ghiaccio pulito (circa 60 – 80%) a seconda della percentuale di superficie attiva. Questo sembra essere dovuto al lento e continuo bombardamento che il nucleo subisce da parte dei raggi cosmici, del vento solare e della radiazione ultravioletta del Sole che trasforma i ghiacci ad alta albedo in materiale refrattario. Per descrivere questi processi, i modelli di nuclei cometari prevedono la formazione di due tipi di mantello: un *mantello di irradiazione*, sviluppato mentre la cometa si trova inattiva nella nube di Oort, e un *mantello roccioso*, che è la conseguenza della sublimazione.

Il mantello di irradiazione si forma quando la cometa è ancora nella nube di Oort ed è soggetta all'irradiazione continua da parte dei raggi cosmici. I raggi cosmici fanno sì che si formi un polimero scuro e refrattario costituito da sostanze organiche complesse a partire dai ghiacci ad alto albedo delle sostanze volatili (per esempio  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), i cui legami vengono indeboliti. Al termine del processo, ossia con la sua saturazione, il mantello dovrebbe aver raggiunto uno spessore di 1 m. Il mantello, inoltre, ricopre interamente la superficie del nucleo a causa dell'isotropia con cui provengono i raggi cosmici.

Da uno studio di Strazzulla (1991) lo stesso processo porterebbe alla formazione anche del mantello roccioso, una crosta solida molto porosa spessa fino a qualche metro. È più probabile, però, che il mantello roccioso sia il risultato della sublimazione dei ghiacci quando la cometa entra nel Sistema Solare. Durante i successivi passaggi al perielio, infatti, il riscaldamento per opera del Sole provoca la sublimazione dei ghiacci il cui gas risultante trasporta con sé le particelle di polvere. Non tutte le particelle, però, riescono ad essere allontanate dal nucleo e finiscono per ricadere sul nucleo stesso formando una crosta di materiale refrattario distribuita irregolarmente che funge da materiale isolante e riduce l'attività cometaria. Lo spessore di tale crosta dipende da fattori come l'efficienza della sublimazione e l'età della

cometa. È stata calcolata la dimensione critica  $d_c$  che permette di distinguere le particelle che fuggono dal nucleo da quelle che vi ricadono. Al di sopra di  $d_c$ , proporzionale a  $r^{-0.5}$  (Orofino et al. 2011), le particelle non riescono ad allontanarsi dal nucleo;  $r$  è la distanza eliocentrica della cometa. Da qui si ricava che particelle con un diametro fino a qualche metro possono essere sollevate quando la cometa si trova al perielio. Particelle più piccole, invece, possono venire accelerate nel flusso del gas e lasciare la cometa. Proprio perchè prive di mantello roccioso, le comete nuove o giovani sono oggetti primitivi e costituiscono un'ottima sorgente di materiale della nebulosa solare. Le comete vecchie possono, invece, diventare completamente inattive o spezzarsi in numerosi frammenti.

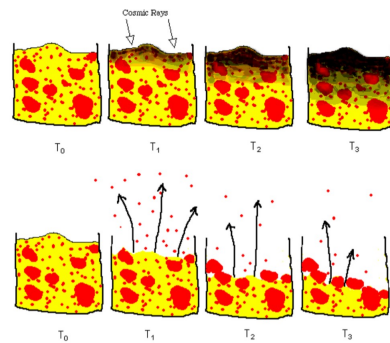


Figura 1.4: Formazione del mantello di irradiazione (in alto) e del mantello roccioso (in basso) (Orofino et al. 2011)

Ritornando brevemente a parlare della dimensione dei nuclei cometari (A'Hearn et al. 2011), bisogna considerare che essa varia ad ogni passaggio al perielio a causa della sublimazione che erode la superficie. Le dimensioni delle comete che osserviamo oggi non sono, quindi, le stesse di quando entrarono la prima volta nel Sistema Solare. Bisogna tenere conto del fatto che le comete sono il risultato dell'aggregazione dei cometesimi durante la formazione dei pianeti e che la massa del nucleo cometario è dominata dalla massa del cometesimo più grande. I nuclei cometari, infatti, hanno basse forze di legame (elevata porosità) soprattutto su grande scala e solamente le più grandi forze compressive permettono ai cometesimi di unirsi e formare i nuclei delle comete. Inoltre il nucleo può frammentarsi spontaneamente o, in meno casi, a causa delle forze di marea esercitate da un corpo più grande. Secondo Boehnhardt (2004), gli eventi di frammentazione possono essere divisi in due gruppi: il primo riguarda i casi in cui si forma un frammento più grande degli altri (circa 10 – 100 m), il secondo i casi in cui il nucleo si rompe in tanti frammenti di dimensioni sconosciute. Infine ogni nucleo ha una probabilità di spezzarsi pari al 3%.

## La chioma

Quando le comete giungono in prossimità del perielio, cioè a distanze inferiori a 5 AU, la sublimazione dei ghiacci dovuta all'azione del calore solare dà origine ad un alone dal diametro compreso tra  $10^4$  e  $10^5$  km, molto maggiore rispetto alle dimensioni del nucleo. Questo alone viene chiamato *chioma* e conta una densità di circa  $10^4 - 10^6$  molecole per  $cm^3$ . Con la formazione della chioma, la cometa può essere individuata nel visibile. Se in precedenza il nucleo poteva essere osservato difficilmente solo grazie alla luce solare che rifletteva, ora si può osservare uno spettro continuo a cui si sovrappongono righe e bande di emissione dovute agli atomi e alle molecole presenti nella chioma (fluorescenza). La luce solare riflessa viene ancora osservata poichè essa viene diffusa dalle polveri che la sublimazione dei ghiacci ha trasportato con una velocità di circa  $0.5$  km/s. La magnitudine di una cometa dipenderebbe solamente dalle distanze dal Sole e dall'osservatore se il nucleo riflettesse semplicemente la luce solare. Nel momento in cui si forma la chioma, però, la magnitudine assume una relazione del tipo

$$m = m_0 + 5 \log(\Delta) + 2.5n \log(r) \quad (1.2)$$

con  $\Delta$  che è la distanza dall'osservatore,  $r$  dal Sole e  $n$  un indice che sembra variare tra 2.5 e 11.5.

L'attività cometaria si manifesta solamente per una breve parte della loro esistenza, quando appunto si avvicinano al Sole. Mentre le comete a corto periodo sono attive per circa il 10 – 30% della loro esistenza, quelle a lungo periodo manifestano una durata dell'attività molto limitata rispetto al tempo trascorso lungo la propria orbita.

L'equilibrio termico di una chioma è garantito da un numero sufficientemente elevato di collisioni. Non essendo gravitazionalmente legata al nucleo, però, la chioma cambia rapidamente in funzione della sua orbita e della distanza dal Sole. Avvicinandosi ad esso, due meccanismi possono modificare la forma della chioma: l'aumento della temperatura fa sì che venga prodotta una quantità maggiore di gas, ampliando la chioma; la maggiore pressione della radiazione solare tende, invece, a ridurla. Inoltre con l'aumentare della distanza dal nucleo, la densità della chioma diminuisce fino a rendere inefficienti le collisioni e favorire la ionizzazione da parte dei fotoni UV solari.

La chioma di una cometa si può dividere in tre aree concentriche dalla simmetria praticamente sferica: dal nucleo verso l'esterno si hanno la *chioma interna o molecolare* che si estende per circa  $10^4$  km, la *chioma intermedia o dei radicali* che si estende fino a  $10^5$  km e la *chioma atomica o UV* (compresa tra circa  $10^5$  e  $10^7$  km). A queste si aggiungo due ulteriori chiome non osservabili da Terra. La prima è la chioma di idrogeno, molto estesa, che emette a  $1212\text{\AA}$  (Ly-alpha). La seconda è la molto meno estesa chioma di OH.

Fin dai primi studi sulle chiome cometarie si è capito che le molecole osservate non sono quelle espulse dal nucleo, le quali devono essere molto più complesse. Queste molecole più complesse chiamate *molecole madri* costituiscono la chioma interna, non osservabile direttamente. La composizione chimica del nucleo e degli strati più interni della chioma viene dedotta dalle molecole della chioma visibile. Tali molecole, chiamate *molecole figlie*, sono il prodotto della *fotodissociazione* e della *fotoionizzazione* delle molecole madri a causa della radiazione solare incidente. Gli stessi processi possono modificare nuovamente le molecole prodotte con il tasso di dissociazione dell'acqua e delle molecole figlie che può cambiare a seconda del flusso UV proveniente dal Sole.

La chioma diventa ben visibile a circa 3 AU quando sublimano il CO e il CO<sub>2</sub>. Più vicino al Sole sublimano anche l'acqua (2.8 AU) e il CN (3 AU circa). Tra le molecole principali osservate troviamo, infatti, il radicale OH, il carbonio bimolecolare C<sub>2</sub>, il cianogeno, il CN e l'ossido di carbonio ionizzato CO<sup>+</sup>. L'ossidril OH<sup>+</sup>, unito al fatto che a 2.8 AU si osservi un aumento della luminosità della cometa, suggerisce, per esempio, la presenza di idrogeno confermata nel 1970 dall'osservazione nell'UV della cometa Tago-Sato-Kosaka. Tra le molecole madri si trovano, oltre all'acqua e a quelle citate in precedenza, l'acido isocianidrico (HNC), l'ammoniaca (NH<sub>3</sub>), il metano (CH<sub>4</sub>) e il cianuro di metile (CH<sub>3</sub>CN).

Le polveri cometarie, trasportate dai gas sublimanti e individuabili nella chioma, sono caratterizzate da due principali componenti: i silicati (specialmente olivina) e i composti di C, H, O e N (le "particelle CHON"), le cui densità medie sono rispettivamente 2.5 e 1 g/cm<sup>3</sup> (Jessberger e Kissel et al. 1991). I secondi, che rilasciano una grande quantità di CN, CO, C<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>CO, dovrebbero apparire sotto forma di mantelli carbonacei che ricoprono nuclei silicatici piuttosto che sotto forma di particelle singole (Jessberger et al. 1991). Le percentuali delle due componenti delle polveri cometarie variano a seconda della cometa in esame e della distanza dal Sole: la percentuale dei silicati varia dal 10 al 97%, quella delle particelle carbonacee dal 90 al 3% (Krishna Swamy et al. 1989, Hanner et al. 1994, Colangeli et al. 1996, Sarmecanic et al. 1997). Inoltre, la chioma di polvere aggiunge la propria emissività termica alla cometa, che a causa della bassa temperatura non è osservabile da Terra poichè è situata nel lontano IR.

La temperatura del nucleo controlla il numero di molecole emesse per unità di tempo Q, o tasso di produzione, che caratterizza l'attività della cometa. Se consideriamo una chioma a simmetria sferica circondante un nucleo di raggio R<sub>n</sub> che emette in modo isotropo Q molecole per secondo, esse si allontaneranno con velocità v corrispondente alla temperatura di equilibrio della superficie nucleare. Il numero totale di molecole che attraversa in un secondo una sfera di raggio R molto maggiore di R<sub>n</sub> centrata sul nucleo, uguale anch'esso a Q, è

$$Q = 4\pi R^2 n(R) v \quad (1.3)$$

dove  $4\pi R^2$  è la superficie della sfera,  $n(R)$  la densità numerica alla distanza R.

## La coda

In vicinanza del perielio, le comete tendono a formare la peculiarità che le contraddistingue: la coda. L'analisi spettroscopica delle code ha mostrato la presenza di due componenti principali che porta alla distinzione di due tipologie di tali fenomeni: la *coda di ioni o di tipo 1* e la *coda di polvere o di tipo 2*. Nonostante capiti che le code possano essere estremamente deboli o non formarsi neanche in prossimità del Sole, la loro esistenza fu postulata fin dalla prima metà dell'Ottocento con la generica idea che esse si formassero con l'emissione di materia dal nucleo sospinta da forze repulsive. Generalmente la densità delle code varia tra 10 e 100 *molecole/cm<sup>3</sup>* con una massa totale che può essere trascurata rispetto a quella dei nuclei ma con una dimensione di gran lunga superiore.

Negli anni '50 del secolo scorso, Biermann affermò che gli atomi ionizzati formati nella chioma vengono spinti in direzione antisolare dal vento solare (con una velocità di circa 450 *km/s*) andando a formare la coda di ioni, la quale si estende anche fino a  $10^7 - 10^8$  km. Più precisamente, il vento solare, costituito da cariche elettriche in moto, genera campi magnetici variabili nel tempo che le particelle ionizzate della chioma cometaria non riescono ad attraversare. Gli ioni compiono un movimento a spirale attorno alle linee del campo e vi rimangono ancorati ("mass loading"). La ionosfera cometaria viene, infine, avvolta dalle linee di campo, le quali vengono trascinate a formare la coda. L'interazione tra la ionosfera cometaria che funge da ostacolo e il campo magnetico del vento solare dovrebbe, inoltre, portare alla formazione di un'onda d'urto "di prua" a circa  $10^5$  km dal nucleo. Gli ioni raggiungono temperature elevate a causa dell'urto ma si raffreddano molto velocemente per via delle collisioni e degli scambi di carica. Questo evento è stato, per esempio, individuato a circa  $5 \times 10^5$  km dal nucleo della cometa Halley ma non per la Giacobini-Zinner osservata nel 1985. La coda di tipo 1, infine, tende al colore blu per fluorescenza dei gas ionizzati. Gli ioni dominanti sono il  $CO^+$  e l' $H_2O^+$  e la coda cambia generalmente aspetto molto rapidamente a causa dei campi magnetici variabili. A volte l'interazione tra il campo magnetico trasportato dal vento solare e quello della cometa provoca la separazione della coda di ioni dalla testa cometaria. Questa situazione dura, però, poche ore perchè la coda può rigenerarsi.

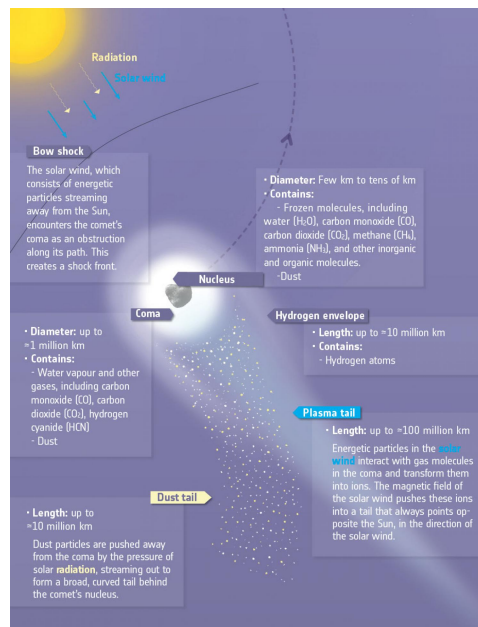


Figura 1.5: Onda d'urto "di prua"

La *coda di polvere* è di colore giallastro e ha uno spettro continuo a causa della luce solare che la polvere diffonde. La formazione di tale coda è dovuta alla radiazione proveniente dal Sole che spinge in direzione antisolare le particelle di polvere della chioma. La coda di polvere si estende meno della coda di tipo 1 (generalmente arriva a  $10^7$  km) e ha una forma incurvata. Questo è dovuto a tre fattori: la velocità della cometa nel suo moto orbitale, la forza gravitazionale esercitata dal Sole che attira le particelle di polvere e la pressione di radiazione solare che invece le allontana. La velocità della cometa

aumenta avvicinandosi al Sole secondo la terza legge di Keplero portando un incremento delle dimensioni della coda e mettendone maggiormente in mostra la curvatura. La forza gravitazionale e la pressione di radiazione solare sono due forze opposte la cui azione influenza la curvatura della coda e il modo in cui le particelle di polvere vengono emesse. Questo perchè esse dipendono entrambe da  $1/r^2$  e la loro differenza definisce una gravità risultante. Rispettivamente sono

$$F_{grav} = \frac{GM_S}{r^2} \left( \frac{\rho_d \pi d^3}{6} \right) \quad (1.4)$$

e

$$F_{rad} = \frac{\pi d^2 Q_{pr}}{4c} \left( \frac{F_S}{4\pi r^2} \right) \quad (1.5)$$

dove  $Q_{pr}$  è un fattore di efficienza della pressione di radiazione,  $d$  e  $\rho_d$  il diametro e la densità di una particella,  $c$  la velocità della luce,  $M_S$  la massa solare,  $r$  la distanza eliocentrica e  $F_S$  il campo di radiazione solare medio.

Per studiare la dinamica delle particelle di polvere si utilizza un parametro  $\beta = (1 - \mu)$  dato dal valore assoluto del rapporto tra le due forze

$$\beta = \frac{F_{rad}}{F_{grav}} = C(\rho_d d)^{-1} \quad (1.6)$$

$$\text{con } C = \frac{3Q_{pr}F_S}{8\pi cGM_S}.$$

Questo parametro riesce a descrivere l'orbita delle particelle di polvere. La gravità risultante, citata prima, che si viene a creare tra la forza gravitazionale e la pressione di radiazione solare, è proporzionale infatti a  $(\beta - 1)$  e porta all'individuazione di due casi, entrambi ottenuti considerando nulla la velocità con cui il nucleo emette le particelle di polvere. Il primo riguarda le particelle con lo stesso valore di  $\beta$ , le *Sindine*. Esse sono emesse continuamente in funzione del tempo e hanno le stesse dimensioni tra loro. L'altro caso include le particelle emesse allo stesso tempo, e quindi con diverso valore di  $\beta$ , per un evento particolare come un outburst. Queste vengono chiamate *Sincrone*. Infine, le particelle con  $\beta > 1$  vengono tutte espulse dal sistema cometario.

Oltre alle due code principali, le comete possono mostrarne anche altri tipi. Uno di questi è l'*anticoda*, una piccola coda diretta verso il Sole, osservabile quando la Terra si trova nel piano orbitale della cometa. Le particelle dell'*anticoda* sembrano essere Sincrone con dimensioni maggiori della media ( $> 10 \mu m$  contro le particelle della coda di polvere che hanno dimensioni  $< 1 \mu m$ ).

Un altro tipo di coda cometaria è la *coda di Sodio*. Essa è una lunga e stretta coda che si sovrappone a quella di polvere. È composta da atomi di sodio neutro che sembrano provenire dalla dissociazione di molecole che lo contengono e che vengono trasportate dalla pressione di radiazione. Sull'origine di questa coda ci sono, tuttavia, ancora dei dubbi nati dal fatto che, a grandi distanze dal nucleo, il sodio dovrebbe essere già ionizzato secondo i modelli standard. Un ulteriore dubbio riguarda l'accelerazione enorme che subiscono gli atomi di Na, la quale non può essere dovuta solamente all'azione del vento solare. La coda è osservabile con filtri centrati sulle righe D del sodio a 5890 Å.



Figura 1.6: I due principali tipi di code cometarie: la coda di ioni (blu) e la coda di polvere (gialla)

### 1.3 Spettri cometari

L'analisi degli spettri cometari è uno degli aspetti principali dello studio delle comete. Essa ci dà la possibilità di investigare su un gran numero di fenomeni che interessano questi oggetti, quali la loro origine e le condizioni del loro luogo di formazione. Studiando gli spettri, infatti, è possibile individuare le specie responsabili delle righe osservate e ottenere informazioni sulle abbondanze atomiche. Solitamente l'analisi degli spettri corrisponde alla ricerca di coincidenze tra le lunghezze d'onda delle righe trovate in laboratorio e quelle osservate. A volte può capitare, però, che molte righe non riescano ad essere riconosciute a causa della mancanza di disponibilità di vari dati su atomi e molecole. Anche le condizioni differenti tra laboratorio e ambiente giocano un ruolo chiave nell'individuazione delle righe. Può accadere che delle righe vengano individuate prima negli spettri cometari e che solo successivamente vengano studiate, come è accaduto per le bande dello ione  $CO^+$ , del  $C_3$  e dell' $H_2O^+$ . Lo spettro di una cometa è costituito da diversi tipi di emissione: un'emissione continua, detta *il continuo*, ed emissioni discrete (righe e bande). Il continuo è un'emissione stretta dovuta alla diffusione della radiazione solare ad opera della polvere che si trova nella chioma e nella coda, la quale fa sì che la distribuzione d'intensità  $\lambda$  del continuo sia uguale a quella della radiazione solare anche se leggermente più arrossata. La larghezza del continuo determina, invece, un diametro che varia da qualche migliaio a qualche decina di migliaia di chilometri e che si estende nella direzione della coda di polvere. Al continuo si sovrappongono un gran numero di emissioni discrete, che possono essere neutre o dovute agli ioni ed estendersi per pochi o numerosi chilometri. Un meccanismo che permette le eccitazioni delle molecole e, quindi, le emissioni della cometa è la fluorescenza. Ciò che accade è che la radiazione incidente viene assorbita in circa 10 – 100 s e un elettrone viene liberato dall'orbitale in cui si trova nell'atomo eccitato per spostarsi in un livello più energetico. L'elettrone decade, poi, in poche frazioni di secondo, dallo stato eccitato a quello di partenza per livelli intermedi, determinando l'emissione osservata. L'emissione osservata nelle comete è affetta dall'effetto Swings, per il quale esiste una correlazione tra la radiazione solare assorbita dalle molecole e l'intensità dell'emissione, dovuta probabilmente alla presenza o meno delle righe in assorbimento di Fraunhofer. Accade, infatti, che la velocità variabile della cometa lungo l'orbita modifica le frequenze assorbite dalle molecole a causa dell'effetto Doppler. Per le transizioni proibite, però, la fluorescenza sembra non essere il meccanismo di eccitazione. Per queste si spiega che la fotodissociazione lascia atomi in alcuni stati che poi decadono producendo, appunto, transizioni proibite.

Come già detto parlando della chioma, una cometa ci appare come una sorgente puntiforme fintanto che si trova a grandi distanze dal Sole. L'unico spettro osservabile sarà, quindi, quello del continuo dovuto alla riflessione della polvere. La regione spettrale del visibile (3000 – 8000 Å) ci fornisce la maggior parte d'informazioni sugli spettri cometari. Dall'osservazione in questo dominio si è potuto studiare il modo in cui le diverse righe delle componenti della chioma compaiono in sequenza. La prima a comparire è la banda (0, 0) del CN (3880 Å) a circa 3 AU. In ordine di apparizione abbiamo, poi, le emissioni dovute al  $C_3$  (caratterizzate da un forte picco a 4050 Å) e al  $NH_2$  a circa 2 AU, e quelle del  $C_2$ , CH, OH (a  $\lambda = 3090$  Å ma difficilmente osservabile da Terra per l'assorbimento dello strato di ozono) e NH a circa 1.5 AU. A distanze eliocentriche inferiori troviamo gli ioni  $CO^+$  (3400 – 6300 Å),  $OH^+$  (3500 Å),  $N_2^+$  e  $CH^+$  (4230 Å). Talvolta possono apparire anche righe del Na (5890 – 5896 Å) quando la cometa si trova a 0.8 AU e numerose righe metalliche (nelle comete sun-grazing quando sono a 0.1 AU). Quando  $r < 1$  AU compare anche l'[OI] (6300, 6364 Å). Dalla coda di tipo 1 si osservano numerose specie di ioni ( $r < 2$  AU) con il  $CO^+$  che è il dominante.

Le bande di Swan del  $C_2$  sono quelle che dominano lo spettro ottico. Per questo motivo l'individuazione di tale molecola permette il calcolo del "diametro visuale" della testa della cometa. Inoltre il  $C_2$  costituisce un'eccezione dei processi di eccitazione dovuti a fluorescenza: c'è infatti una discrepanza fra le intensità osservate e quelle previste in laboratorio dovuta probabilmente alla distanza eliocentrica. Le molecole di CN mostrano due transizioni principali: quella "rossa" a circa 7800 Å e quella "viola" compresa tra 3600 e 4200 Å, caratteristica molto accentuata negli spettri delle comete. Nella regione UV (circa a 3100 Å) e nell'infrarosso (circa a 3  $\mu m$ ) vengono viste le prime righe dell'OH dovute alla dissociazione delle molecole d'acqua. Questo fenomeno viene chiamato prompt emission per il fatto che l'emissione avviene subito entro pochi minuti dalla dissociazione. L'osservazione di queste righe, che avviene molto vicino al nucleo, ricopre una notevole importanza nello studio della chioma interna e della dissociazione dell'acqua. Infatti quest'emissione traccia la distribuzione spaziale delle molecole precursori nella chioma a causa della

transizione proibita dell'ossigeno.

L'osservazione nella regione ultravioletta dello spettro (1000 – 4000 Å) è possibile dallo spazio. In questa regione è possibile osservare numerose transizioni di risonanza ed emissioni molecolari. Le prime osservazioni vennero fatte per la cometa West, nello spettro della quale vennero identificate molecole di CS (2576 Å), di  $CN^+$  (3185 Å) e di CO (1500 Å) oltre che dell'OH. Sempre nella regione ultravioletta si possono osservare atomi derivanti da molecole più complesse, quali H, O, C, N e S. Circa intorno e sotto i 1800 Å, si trovano anche numerosi multipletti (CI a 1561 Å, OI a 1304 Å, CII a 1335 Å e SI). Da alcune osservazioni del satellite orbiting astronomical observatory (OAO-2) fatte a 1216 Å (riga Lyman  $\alpha$  dell'H) è stato possibile individuare in alcune comete un alone di idrogeno attorno alla chioma visibile, il quale portò a pensare che i tassi di perdita di massa delle comete fossero maggiori di quelli considerati fino a quel momento (1970). La ricerca di gas nobili nell'UV non ha portato a risultati a causa della scarsa reattività e alta volatilità di questi atomi, la cui presenza aiuterebbe a studiare la storia termica di un nucleo cometario.

Nel dominio dei raggi X sono state trovate emissioni degli ioni del carbonio, dell'ossigeno e dell'azoto. Nell'infrarosso si possono individuare numerose bande del CN oltre alle più deboli emissioni del  $NH_2$  e del  $C_2$ . Per  $\lambda$  superiore ai 10000 Å vengono osservate righe di fluorescenza non risonante dell'acqua (2.9  $\mu m$ ), le hot bands. Nello stesso dominio si trovano anche le righe di numerosi idrocarburi, quali il metano ( $CH_4$ ), l'acetilene ( $C_2H_2$ ) e l'etano ( $C_2H_6$ ). Il  $CO_2$  è individuabile solamente nell'IR, a causa di transizioni proibite nella regione del radio. A lunghezze d'onda abbastanza elevate ( $> 1 \mu m$ ) sono presenti le righe di idrocarburi policiclici aromatici (PAH) e di silicati.

Nelle comete sono state individuate anche molte molecole complesse, per esempio la glicina, che potrebbero essere le molecole-madri dei radicali osservati. La varietà di complessità delle molecole resta comunque minore di quella del mezzo interstellare.

Infine, per quanto concerne le abbondanze isotopiche, possiamo dire che esse sono molto utili per carpire informazioni sulle condizioni ai tempi di formazione delle comete. Il loro studio, però, è limitato a comete brillanti in quanto viene richiesta una risoluzione spettrale elevata per separare le righe degli isotopi da quelle normali. Per molte comete è stato stimato il rapporto isotopico  $^{12}C/^{13}C$  dal paragone dei rapporti di intensità osservate della banda di Swan del  $C_2$  e della banda di  $^{12}C/^{13}C$  a 4745 Å. Quest'ultima riga rende necessario l'utilizzo di alta risoluzione spettrale e di un buon rapporto segnale-rumore a causa del fatto che è sovrapposta con le righe delle emissioni del  $NH_2$ . Il rapporto isotopico di cui si è appena parlato è ottenibile anche dallo studio del CN, del HCN e di altri composti del carbonio. I valori ottenuti sono compatibili con il valore terrestre di 89 con una leggera mancanza di  $^{13}C$ . Il mezzo interstellare mostra, invece, valori compresi tra 20 e 80 dovuti ad un arricchimento di  $^{13}C$  ad opera dei cicli CNO delle stelle. Per quanto riguarda il rapporto isotopico dell'azoto  $^{14}N/^{15}N$ , misurabile nel  $NH_3$ , nel HCN e nel  $N_2$ , è stato trovato un valore pari a circa 140 costante per tutte le comete. Inoltre è stato trovato un arricchimento di  $^{15}N$  rispetto ai valori del Sole, non ancora spiegabile. Le righe nel radio mostrano invece un rapporto di circa 300, molto più simile al valore terrestre (270).

Il rapporto  $D/H$  è di notevole importanza poiché il deuterio è stato sintetizzato nelle prime fasi evolutive dell'universo. Di questo rapporto ne sono stati stimati parecchi valori che sembrano variare considerevolmente di cometa in cometa. Per esempio per la cometa Halley è stato trovato un valore di circa  $3 \times 10^{-4}$  dal rapporto  $HDO/H_2O$  mentre per la Hale Bopp è di  $2.3 \times 10^{-3}$ . Il primo rappresenta anche il valore medio del rapporto isotopico nell'acqua per la maggior parte delle comete, il quale è circa il doppio del valore terrestre ( $1.5 \times 10^{-4}$ ). Questo risultato ci dice che l'acqua terrestre non arriva dalle comete con questi valori (OCC e JFC), il che non esclude che sia arrivata da planetesimi della prima fase di formazione del Sistema Solare. Il valore del rapporto  $D/H$  nell'acqua per le comete è circa 10 volte più grande dello stesso rapporto per la nebulosa solare primordiale ( $2.5 \times 10^{-5}$ ). Questo può essere dovuto all'effetto di frazionamento delle reazioni tra ioni e molecole o a processi che coinvolgono la polvere nella nebulosa solare.

Le prime misurazioni dell'abbondanza di tre gas nobili (Ar, Kr e Xe) furono possibili con la missione Rosetta. I rapporti isotopici di questi elementi riflettono la loro origine nucleosintetica a causa del fatto che hanno bassissime reattività. Per l'argon venne misurato un rapporto ( $5.4 \pm 1.4$ ) molto simile ai valori terrestri e del Sistema Solare. Per il Kr e i suoi cinque isotopi stabili furono misurati valori solari. Per il Xe venne trovato un arricchimento in  $^{129}Xe$ , probabilmente dovuto al decadimento radioattivo del  $^{129}I$  in eccesso nella zona di formazione del ghiaccio cometario.



Concludendo, si può notare che generalmente gli altri rapporti isotopici hanno valori consistenti con quelli del Sistema Solare.

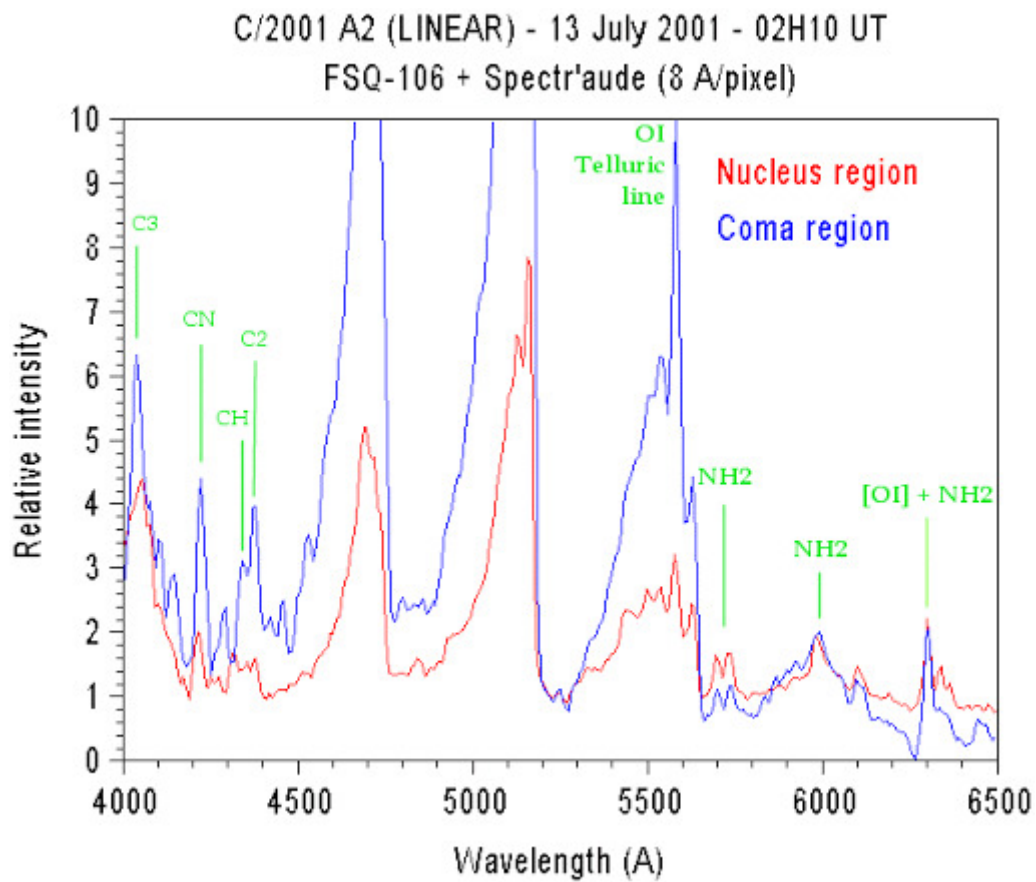


Figura 1.7: Esempio di spettro della cometa C/2001 A2 Linear



## Capitolo 2

# La cometa interstellare 2I/Borisov

Da decenni si è ipotizzata l'esistenza di comete interstellari che potessero penetrare il Sistema Solare. Da qualche anno, con la scoperta dell'oggetto interstellare apparentemente asteroidale "*Oumuamua*", quest'idea è iniziata a divenire concreta. Recentemente è stata scoperta quella che viene ritenuta come la prima cometa interstellare: infatti, il 30 Agosto 2019, Gennady Borisov osserva per la prima volta la cometa *2I/2019 Q4 (2I/Borisov)* annunciandola pubblicamente l'11 Settembre dello stesso anno. La scoperta avvenne a soli  $38^\circ$  di elongazione solare e l'orbita è stata identificata come altamente iperbolica con un eccesso di velocità di circa 32 km/s suggerendo un'origine interstellare per *2I/Borisov*. *2I* sembra una tipica cometa del Sistema Solare con una prominente chioma di polvere evidente alla scoperta (Bolin et al. 2019, Guzik et al. 2019, Jewitt and Luu et al. 2019) e deboli linee spettrali indicanti che la cometa è attiva (Fitzsimmons et al. 2019, McKay et al. 2019). La cometa ha raggiunto il perielio l'8 Dicembre 2019 alla distanza  $q = 2.006$  AU e raggiungerà le distanze di Giove e Saturno rispettivamente nel Luglio 2020 e nel Marzo 2021.

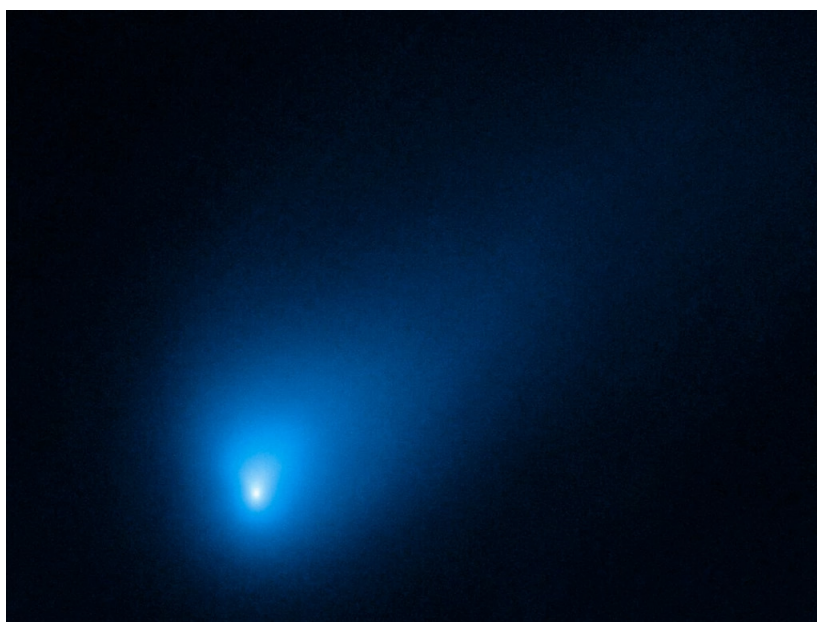


Figura 2.1: Immagine della cometa 2I/Borisov presa da HST

### 2.1 Caratterizzazioni iniziali della cometa interstellare 2I/Borisov

Dalle immagini prese il 10 e il 13 Settembre 2019, rispettivamente con il William Herschel Telescope (Canarie) e il Gemini North Telescope (Hawaii) (Guzik P., Drahus M., Rusek K., Waniak W., Cannizzaro G., Pastor-Marazuela I. et al. 2019) quando la cometa è ad una distanza eliocentrica di 2.8 AU, si notano una chioma estesa e una coda debole e larga in direzione antisolare con un indice di colore g-r leggermente arrossato ( $0.66 \pm 0.01$  mag) e più rosso rispetto al valore solare ( $0.45 \pm 0.02$  mag), compatibile con le comete

del Sistema Solare. Gli stessi risultati sono stati ottenuti con diverse aperture fotometriche. Questo implica un colore della chioma uniforme che, unito alla similitudine morfologica tra le bande g e r, indica un'attività cometaria dominata dalla polvere. Dalle magnitudini fotometriche, il nucleo sembra avere un raggio di circa 1 km e una superficie sublimante di  $5 \text{ km}^2$  (30% di frazione del nucleo attiva). Questa prima stima è comunque molto incerta e necessita di ulteriori osservazioni. Le accelerazioni non gravitazionali sono di due o tre ordini di grandezza superiori a quelle misurate per altre comete. I dati, però, sono accuratamente descritti da una soluzione puramente gravitazionale che implica una forte orbita iperbolica con eccentricità di  $3.38 \pm 0.02$  non causabile dalla perturbazione dovuta ai pianeti del Sistema Solare: 2I/Borisov è un oggetto interstellare. Infine vengono stimate la probabilità di rottura rotazionale (ossia quando il nucleo si frammenta poichè la velocità di rotazione è troppo elevata per permettere alla gravità e alle forze di legame di mantenere intatto il corpo), inferiore all'1%, la velocità di espulsione ( $44 \pm 14 \text{ m/s}$ ) e le dimensioni delle particelle di polvere con  $\beta = 1$  ( $a = 1.2 \mu\text{m}$ ).

In un altro articolo (Jewitt D., Luu J. et al. 2019) si analizzano le immagini prese tra il 13 Settembre e il 4 Ottobre al Nordic Optical Telescope (Canarie). Tali immagini mostrano una stabile chioma di polvere e una coda disposta sul piano del cielo lunga  $1.4 \times 10^8 \text{ m}$ . Supponendo che la coda di polvere sia effettivamente disposta in direzione antisolare e tenendo quindi conto dell'angolo di fase, la sua lunghezza reale sarebbe  $L_0 = 4.8 \times 10^8 \text{ m}$ . Inoltre, considerando un'albedo geometrica pari a  $p = 0.1$  e dopo aver calcolato la magnitudine assoluta per ogni notte di osservazione, è stato trovato che la sezione d'urto media della polvere entro 15000 km dal nucleo è circa  $130 \text{ km}^2$  e aumenta dell'1% al giorno: questo tasso indica che la cometa era attiva da 100 giorni prima delle osservazioni, quando si trovava a 4.5 AU dal Sole. L'assunzione dell'albedo geometrica tiene conto del fatto che i grani di polvere non sono ghiacciati (non sono state osservate bande di assorbimento del ghiaccio d'acqua), fatto che altrimenti darebbe un valore di p più elevato. La massa della chioma è stata calcolata da una relazione con la sezione d'urto effettiva ( $M \sim 4\rho\bar{a}C_e/3$ ). Per cui  $M \sim 1.3 \times 10^7 \text{ kg}$  con un tasso di produzione di polvere (raggio effettivo  $\bar{a} \sim 100 \mu\text{m}$  e densità  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) pari a  $dM/dt \sim 2 \text{ kg/s}$ . È possibile supporre anche un tasso di perdita di massa d'acqua pari a circa  $60 \text{ kg/s}$  (Fitzsimmons et al. 2019) se assumiamo valido per la Borisov il tasso  $Q_{H_2O}/Q_{CN} = 360$ , tipico delle comete del Sistema Solare. Gli autori utilizzano la sezione d'urto anche per ricavare inizialmente un limite superiore al raggio del nucleo tramite la relazione  $r_n = (C_e/\pi)^{1/2}$ : dai dati ricavati dall'osservazione della notte del 26 Settembre 2019 si ottiene che il raggio del nucleo è sicuramente  $< 3.8 \text{ km}$ . Il valore risulta più grande dell'articolo citato in precedenza a causa della contaminazione di polvere dell'apertura fotometrica. Ci si aspetta, quindi, che il raggio nucleare sia più piccolo. Se la superficie fosse composta da ghiaccio d'acqua orientata perpendicolarmente alla direzione solare, si avrebbe a 2.7 AU un raggio nucleare di 0.35 km. Vengono, infine, calcolati gli indici di colore che confermano il leggero arrossamento rispetto al Sole, con una notevole somiglianza con le comete a lungo periodo. La cometa 2I/Borisov è anche mancante di materia "ultrarossa", ossia con una pendenza spettrale superiore a 25%/1000 Å.

Usando l'Hubble Space Telescope sono state fatte altre osservazioni (Jewitt D., Hui M., Kim Y., Mutchler M., Weaver H., Agarwal J. et al. 2019) ad alta risoluzione angolare. Dal profilo di brillantezza superficiale di 2I/Borisov si è ottenuto il limite superiore più forte per quanto concerne le dimensioni del nucleo ( $r_n \leq 0.5 \text{ km}$  con albedo pari a 0.04). Un nucleo più grande con quest'albedo misurerebbe un eccesso nel profilo centrale di brillantezza superficiale. Un limite empirico all'accelerazione non gravitazionale, invece, pone un limite inferiore al raggio del nucleo ( $r_n > 0.2 \text{ km}$ ) con densità  $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ . La produzione di gas riscontrata è quella che ci si attende da un intero nucleo sublimante in equilibrio con  $r_n = 0.4 \text{ km}$ . Questo dato è, però, incerto poichè non si conosce la frazione di superficie attiva  $f_A$ . Infine ci si aspetta che lo stato rotazionale cambi tra l'epoca della scoperta della cometa e le sue ultime osservazioni nel 2020 con il nucleo che potrebbe rompersi.

## 2.2 Composizione chimica

La composizione chimica delle comete del Sistema Solare porta alla suddivisione in vari gruppi che danno informazioni sulle diverse regioni di formazione di questi oggetti nel disco protosolare esterno. Dalla scoperta di 2I/Borisov si sta analizzando il suo contenuto in gas per poterne ottenere una classificazione preliminare e derivarne un modello di formazione.

Da alcuni lavori precedenti (de Léon et al. 2019 e Fitzsimmons et al. 2019) sappiamo che per 2I/Borisov ci si aspetta una pendenza spettrale arrossata rispetto allo spettro solare tra  $0.55 - 0.90 \mu m$ , simile a quella di asteroidi di tipo D e di nuclei cometari. Per la Borisov, Fitzsimmons (2019) ha trovato emissioni del CN ( $Q \sim 4 \times 10^{24} \text{ molecole/s}$ ), di  $C_2$  ( $Q \leq 4 \times 10^{24} \text{ molecole/s}$ ) e ha stimato un tasso di produzione dell'acqua pari a  $Q \sim 1.7 \times 10^{27} \text{ molecole/s}$ . Inoltre le comete tipicamente ricche in carbonio hanno rapporti dei tassi di produzione pari a circa  $Q(C_2)/Q(CN) \sim 0.66 - 3.0$  mentre le comete con meno  $C_2$  sono chiamate "depleted".

Dalle osservazioni del 20 Settembre e del 1 Ottobre dal 2.30 m Bok e dal 6.50 m MMT (Stati Uniti) (Kareta T., Andrews J., Noonan J., Harris W., Smith N., O'Brien P., Sharkey B., Reddy V., Springmann A., Lejoly C. et al. 2019), quando la cometa era a 2.67 e 2.50 AU, si è trovata la banda (0,0) a  $3880 \text{ \AA}$  del CN. Essa è una caratteristica a due picchi relativamente stretta che è stata integrata tra  $3861$  e  $3884 \text{ \AA}$  ottenendo una forte rivelazione spettralmente risolta ( $Q = 5.3 \pm 0.7 \times 10^{24}$ ). La banda di Swan del  $C_2$ , con un bordo a  $5167 \text{ \AA}$ , è una più ampia caratteristica distribuita su circa  $100 \text{ \AA}$  la cui forma ha un picco vicino al bordo e uno più smussato vicino a  $5100 \text{ \AA}$ . Essa è stata integrata tra  $5000$  e  $5167 \text{ \AA}$  rivelandone la presenza nell'osservazione del 1 Ottobre ( $Q = 2.5 \pm 0.5 \times 10^{24}$ ). Usando il modello di Haser hanno, poi, convertito i flussi integrati in tassi di produzione (riportati precedentemente) che portano ad un rapporto  $Q(C_2)/Q(CN) = 0.47 \pm 0.11$ . Tale valore mostra che 2I/Borisov è probabilmente nel gruppo "depleted" della tassonomia di A'Hearn et al. (1995) poichè inferiore al rapporto limite  $Q(C_2)/Q(CN) = 0.66$ . La Famiglia di Giove è il gruppo che mostra una percentuale maggiore di comete "depleted". La cometa potrebbe essersi formata, quindi, in una regione simile a quella delle comete della Famiglia di Giove. L'osservazione del  $C_3$  e ulteriori analisi dei rapporti di produzione porterebbero a una miglior descrizione della tassonomia della Borisov.

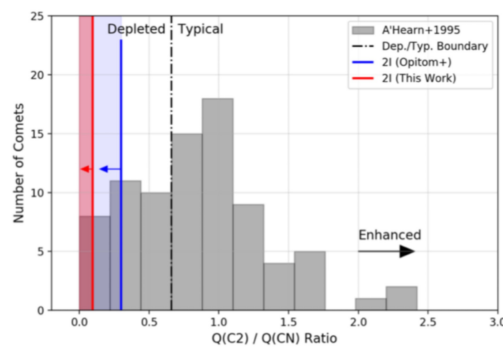


Figura 2.2: Rapporto dei tassi di produzione di  $C_2$  e CN

La riga  $[OI]$  a  $6300 \text{ \AA}$  può essere usata come indice per trovare il tasso di produzione dell'acqua nelle comete. Questa riga è una transizione proibita il cui stato superiore è popolato in modo più efficiente quando OI viene rilasciato nella chioma nello stato  $^1D$  dopo la fotodissociazione di una molecola parente (in questo caso è solitamente l'acqua). L'osservazione dell'11 Ottobre (McKay A., Cochran A., Dello Russo N., DiSanti M. et al. 2019) con il 3.50 m dell'ARC Telescope all'Apache Point Observatory a Sunspot, che garantisce spettri ad alta risoluzione, ha permesso l'individuazione di tale riga. Successivamente è stato possibile calcolare il tasso di produzione dell' $H_2O$  pari a  $(6.3 \pm 1.5) \times 10^{26} \text{ molecole/s}$  usando il flusso osservato, trovato fittando una gaussiana al profilo di riga, nel modello di Haser. L'individuazione della riga dell' $[OI]$  a  $6300 \text{ \AA}$  è anche in accordo con il tasso di produzione dell'OH trovato da Opitom et al. 2019 ( $Q = 2.0 \times 10^{27} \text{ molecole/s}$ ). Da qui, e usando i tassi di produzione del CN trovati da altri autori (Fitzsimmons et al. 2019, Kareta et al. 2019, Opitom et al. 2019), è stato possibile fornire dei valori dei rapporti di  $CN/H_2O$  ( $= 0.59 \pm 0.15\%$ ,  $0.84 \pm 0.23\%$  o  $0.30 \pm 0.07\%$ ) e  $C_2/H_2O$  (minore di  $0.63\%$ ,  $= 0.40 \pm 0.12\%$  o minore di  $0.1\%$ ). I risultati del primo tipo di rapporto suggeriscono che la Borisov abbia valori tipici o maggiori di CN rispetto alle comete del Sistema Solare mentre i secondi ci dicono che dovrebbe essere mancante, o al limite con valori tipici, di  $C_2$  se comparati con l'acqua. Il rapporto polvere-gas, inoltre, e le stime della massa di polvere sembrano consistenti con quelli delle comete del Sistema Solare. Infine, usando un semplice modello di sublimazione, si trova un'area di  $H_2O$  attiva di circa  $1.7 \text{ km}^2$  e un tasso di perdita di massa dell'acqua pari a  $\sim 19 \text{ kg/s}$ . Questi valori, uniti con i limiti attualmente conosciuti sulle

dimensioni del nucleo, impongono una notevole varietà di valori della frazione di superficie attiva, la quale può andare dall'1% a oltre il 100% (nucleo iperattivo) a seconda dei modelli utilizzati. Tutti questi risultati suggeriscono che il tasso di perdita di gas sia un ordine di grandezza superiore a quello della polvere che, però, dipende notevolmente dai modelli utilizzati: la Borisov sembra essere più ricca di gas rispetto alle classiche comete del Sistema Solare.

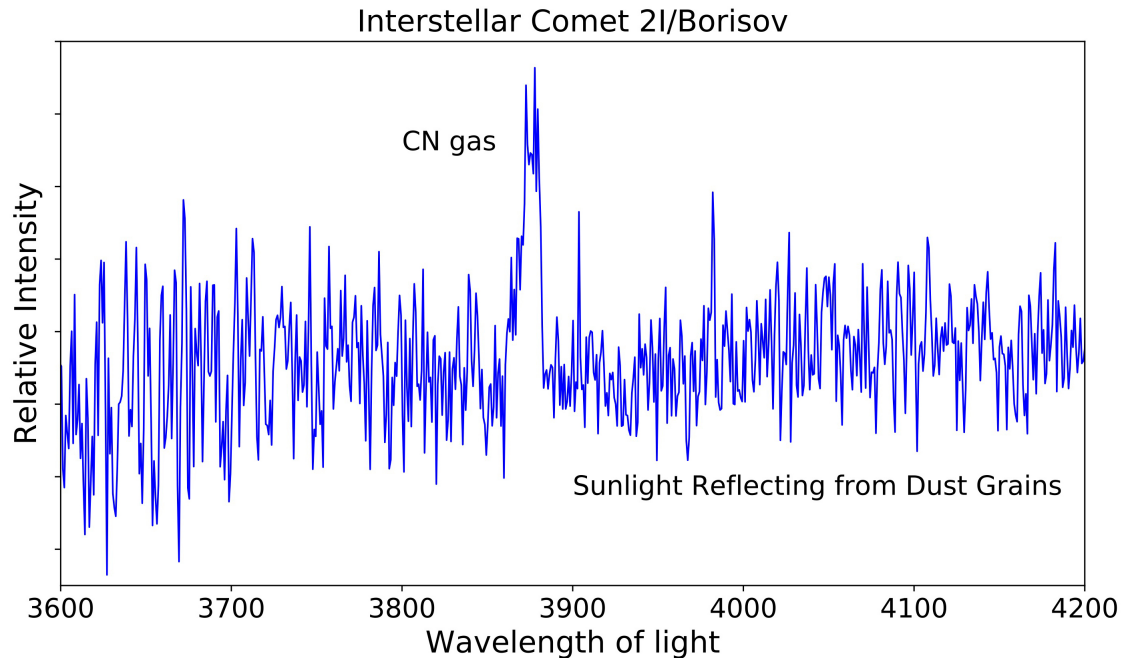


Figura 2.3: Righe del CN a 3880 Å nello spettro di 2I/Borisov

Quando si formano pianeti giganti, una gran parte di planetesimi viene espulsa dal sistema in cui si trova nel mezzo interstellare. Può capitare, quindi, che un certo numero di planetesimi extrasolari attraversi il mezzo interstellare e anche il nostro Sistema Solare. Questi oggetti dovrebbero essere principalmente composti di ghiacci con una piccola parte rocciosa. In un articolo (Yang B., Kelley M., Meech K., Keane J., Protopapa S. e Bus S. et al. 2019) si parla della ricerca di ghiaccio d'acqua nella chioma della cometa 2I/Borisov, la cui scoperta porterebbe a considerare maggiori densità di superficie ed efficienza di legame, e quindi a formulare un modello migliore di formazione dei pianeti extrasolari giganti. I ghiacci sono, infatti, molto sensibili ai cambiamenti indotti da processi radiativi e termici potendo così fare da collante centrale per i nuclei planetari. Il ghiaccio d'acqua viene rilevato tramite le bande di assorbimento nell'infrarosso a 1.5 e 2.0  $\mu\text{m}$ . Esso se non viene scaldato a 137 K si trova nella forma amorfa. A causa delle condizioni della prima fase di vita delle comete con temperature e pressioni basse, ci si aspetta che esse siano composte di ghiaccio d'acqua amorfo. Nella seconda fase evolutiva delle comete, esse vengono colpite da radiazione solare raggiungendo i 137 K e facendo sì che il ghiaccio amorfo cristallizzi spontaneamente ed irreversibilmente in cubico (in esagonale se raggiunge i 160 K). Ci si attende, quindi, che le comete vecchie siano costituite almeno parzialmente da ghiaccio cristallino mentre le comete nuove solo da ghiaccio d'acqua amorfo. L'individuazione del ghiaccio d'acqua nella Borisov metterebbe dei limiti a ciò che può aver influenzato l'evoluzione della cometa. Nell'articolo si mostrano gli spettri ottenuti dalle osservazioni. Essi sono "featureless", hanno inclinazioni spettrali moderatamente rosse e non mostrano le bande di assorbimento tipiche del ghiaccio d'acqua. Inoltre, osservazioni in ottico hanno fatto notare che la chioma della Borisov è dominata da particelle di grandi dimensioni in contrapposizione ad antecedenti tentativi di individuazione del ghiaccio d'acqua in altre comete (particelle ghiacciate molto piccole). Per stabilire un limite superiore dell'ammontare di grani di ghiaccio nella chioma di 2I/Borisov, gli autori hanno sintetizzato uno spettro di ghiaccio puro d'acqua usando tre diversi raggi effettivi delle particelle (1, 10, 100  $\mu\text{m}$ ) e successivamente hanno creato un miscuglio di ghiacci usando carbonio amorfo. Siccome la cometa è osservata ad elevate masse d'aria, le regioni spettrali pesantemente affette

dall'assorbimento terrestre a 1.4 e 1.9  $\mu\text{m}$  sono state escluse dal risultato finale. La banda a 1.5  $\mu\text{m}$  negli spettri cometari è sensibile alle impurità. Per questo essa influenza la grandezza delle particelle e può essere assente. Per stimare l'abbondanza di ghiacci d'acqua (non superiore al 10%) viene usata quindi la banda a 2.0  $\mu\text{m}$ . Infine viene stimato il tempo vita dei grani di ghiaccio di  $\text{H}_2\text{O}$  di varie dimensioni alla distanza eliocentrica di 2.6 AU in base alla percentuale di impurità dovuta a materiale refrattario (0.5%, 1.0%, 2.0%). Si conclude che, non essendo stato osservato ghiaccio d'acqua, particelle di ghiaccio con raggio di 10  $\mu\text{m}$ , se presenti, devono avere almeno l'1% di carbonio mentre se il raggio è di 1  $\mu\text{m}$  basta lo 0.5%. Particelle più grandi sono possibili solamente se presenti in zone molto vicine al nucleo e se costituiscono una piccola frazione della sezione d'urto della chioma. La pendenza spettrale cambia man mano che una cometa si avvicina al Sole e a seconda delle dimensioni delle particelle nella chioma. Questo può indicare un cambiamento nelle componenti organiche di 2I/Borisov e nella sua distribuzione delle dimensioni delle particelle nella chioma. Rispetto alle prime osservazioni, la pendenza spettrale della cometa in esame è più piatta: sembra, quindi, che la Borisov non contenga materia fortemente organica probabilmente perchè sublimata dalla radiazione solare durante il suo ingresso nel Sistema Solare.

### 2.3 Ricerca di un luogo d'origine per 2I/Borisov

In molti hanno cercato un candidato per essere il sistema natale di 2I/Borisov tracciando indietro nel tempo il movimento della cometa. Per avere un buon candidato bisogna trovare che 2I/Borisov sia passata, indietro nel tempo, molto vicina al sistema in esame e che la sua velocità relativa ad esso durante il passaggio sia stata molto bassa.

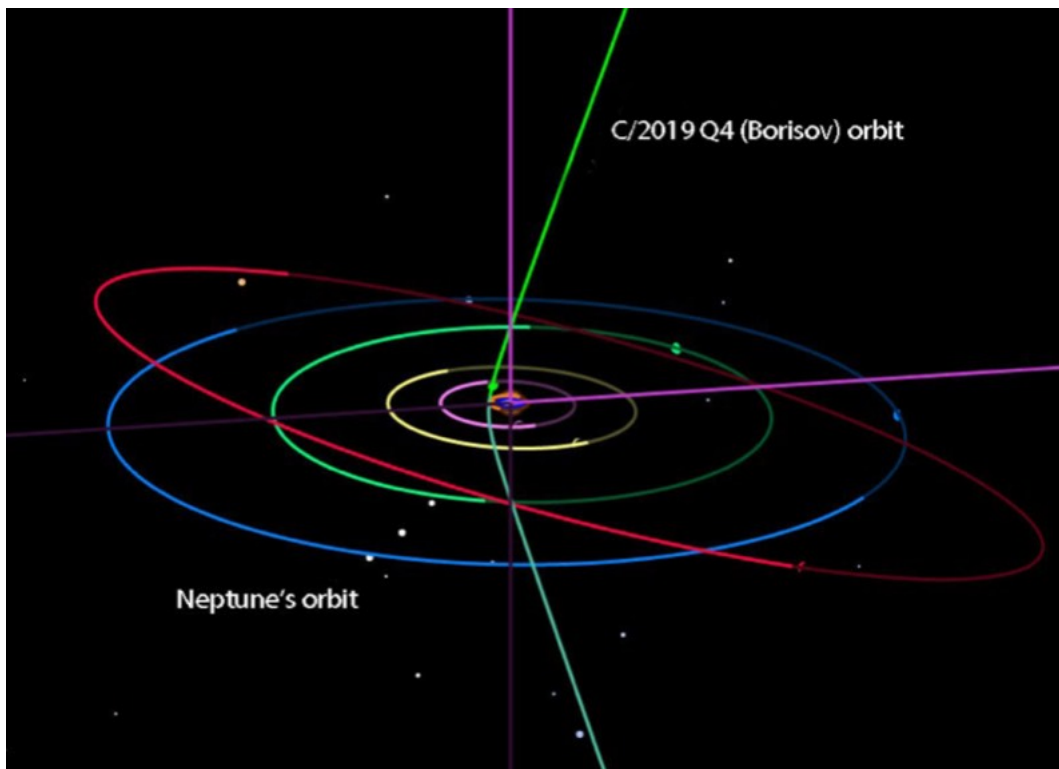


Figura 2.4: Orbita di 2I/Borisov nel Sistema Solare

Tra i candidati uno in particolare è stato analizzato inizialmente (Dybczynski P, Krolikowska M. e Wysoczanska R. et al. 2019): il sistema binario Kruger 60. 2I/Borisov avrebbe dovuto incontrare questo sistema circa 1 Myr fa alla distanza di 1.74 pc e con una velocità relativa pari a 3.43  $\text{km/s}$ . In una prima versione dell'articolo, gli autori hanno determinato l'orbita baricentrica originale propagando numericamente ogni orbita eliocentrica osculante. Il risultato dava però basse probabilità che Kruger 60 fosse il sistema natale della cometa in esame perchè l'incertezza sulle velocità radiali del sistema stesso influen-

zava l'analisi. L'analisi venne ripetuta in seguito avendo trovato nove osservazioni della cometa effettuate prima della sua scoperta ufficiale che permisero di calcolare una soluzione puramente gravitazionale. Vennero trovate, inoltre, nuove soluzioni non gravitazionali orbitali basate sulla sublimazione di ghiaccio d'acqua e di CO, anche se veramente incerte. Durante la scrittura dell'articolo, gli autori hanno ottenuto un valore aggiornato e meno incerto della velocità radiale sistematica di Kruger 60 ( $-34.07 \text{ km/s}$  con un errore stimato di  $0.5 \text{ km/s}$ ) che sembra confutare l'idea che questo sistema possa essere il luogo d'origine di 2I/Borisov.

2I/Borisov potrebbe aver avuto un altro incontro ravvicinato, circa 910 kyr fa, con la stella di tipo M0V Ross 573 alla distanza di 0.068 pc e a  $23 \text{ km/s}$  (Bailer-Jones C., D., Ye Q., Meech K. e Micheli M. et al. 2019). La cometa sarebbe stata espulsa dal sistema stellare tramite un'interazione a tre corpi con una velocità di fuga di qualche  $\text{km/s}$ , se il terzo corpo è un pianeta gigante. Gli autori hanno calcolato l'orbita della cometa e, usando i dati del catalogo Gaia DR2 con le velocità radiali, hanno tracciato indietro nel tempo le posizioni stellari per identificare incontri ravvicinati. Ross 573, nel catalogo Simbad, è considerata una stella nana di tipo M0 con una magnitudine in banda V di 10.0 mag e una evidente mancanza di binarietà. Assumendo che abbia una massa di  $0.7 M_{\odot}$ , avrebbe deviato 2I/Borisov di  $36''$ . L'incontro ravvicinato, comunque, non significa che la stella sia l'origine della cometa in esame ma ci fornisce una stima di quanto spesso può avvenire un tale evento per la Borisov (circa  $19.7 \pm 2.2$  incontri entro 1 pc per Myr). Il tasso d'incontri entro 0.067 pc è invece  $0.088 \pm 0.010$  per Myr che è 12 volte maggiore del tempo percorso all'indietro fino all'incontro con Ross 573: il sistema in esame sembra essere solamente un possibile incontro ravvicinato. Infine, la presenza di un pianeta gigante non basta a spiegare la velocità di fuga della cometa Borisov, per la quale servirebbe un oggetto dotato di una maggiore massa che affianchi Ross 573. Potrebbe bastare il passaggio ravvicinato di un'altra stella nella stessa epoca. Questo evento non è stato, però, individuato.

## 2.4 Previsioni per il periodo post perielio

Le traiettorie di oggetti interstellari sono di difficile previsione a causa delle perturbazioni stellari. Eubanks T.M. et al. (2020) mostra che il vettore velocità all'infinito della Borisov è molto vicino al moto del gruppo stellare dinamico Wolf 630 in tutte le sue componenti: la cometa sembra far parte di questo gruppo. Inoltre, stelle AGB ricche di carbonio richiedono tra i 0.5 e i 2.0 Gyr per formarsi: Wolf 630 sembra, quindi, abbastanza vecchio da essere l'origine di alcuni PMSO ricchi di carbonio.

L'evoluzione stellare del Braccio Gigante Asintotico (AGB) può, infatti, portare alla creazione di oggetti dopo la sequenza principale (PMSO). La nucleosintesi del AGB può produrre tre differenti classi chimiche di PMSO a seconda che questi oggetti siano ricchi di ossigeno, carbonio o azoto a causa della massa iniziale della stella. L'evoluzione chimica della galassia è dovuta principalmente alla lenta cattura di neutroni in stelle AGB e a processi presenti nelle Supernove. Il materiale prodotto da stelle AGB permea gran parte del disco galattico: per questo motivo dalla condensazione di esso si possono formare numerosi PMSO.

Stelle di masse comprese tra 0.8 e  $8 M_{\odot}$  entrano nella fase AGB dopo aver abbandonato la sequenza principale e aver bruciato He nel nucleo (fase di gigante rossa). Nella fase AGB le stelle bruciano idrogeno e l'elio si accumula nel tempo fino ad iniziare anch'esso a bruciare, causando numerose pulsazioni termiche. Queste ultime causano a loro volta una forte convezione che porta in superficie il materiale delle shell. Quando non brucia più l'H, la stella diventa molto calda ed inizia ad espellere gli strati esterni fino a diventare una nana bianca. Il materiale espulso raffredda molto velocemente. Durante la sequenza principale, molte stelle hanno superfici ricche di ossigeno. Quando passano nella fase AGB, può accadere che gli impulsi termici portino in superficie anche del carbonio: stelle con masse inferiori a  $1.5 M_{\odot}$  non diventano, però, ricche di C; se la massa della stella è almeno di  $3-3.5 M_{\odot}$  il rapporto C/O tende a superare l'unità e si può addirittura entrare in una fase (Hot Bottom Burning) in cui si ha la cattura di protoni (catena CNO) e un aumento dell'abbondanza di azoto. In quest'ultima fase si può produrre anche del Li, individuabile in alcuni PMSO. Nelle fasi seguenti alla AGB, una stella espelle materiale trasportato da venti forti. La polvere trasportata può andare incontro ad instabilità che fanno in modo che ci sia condensazione molecolare che a sua volta porta alla formazione dei PMSO. Non essendo la formazione dei PMSO dovuta alla gravità, alcuni di essi possono venire dispersi nella galassia.

Le emissioni, rilevate e descritte nella sezione 2.2 a pagina 26, unite al fatto che non sono ancora stati osservati l'OH, l' $H_2O$  o il ghiaccio d'acqua, fanno intendere che la cometa 2I/Borisov possa essere un PSMO ricco di carbonio soggetto a forti raggi stellari UV durante la sua formazione. Secondo l'autore, la cometa continuerà a mostrarsi povera di acqua durante il proseguimento della sua orbita, soprattutto se verranno individuate le righe delle emissioni di SiC ( $11.3 \mu m$ ) o del carbonio nell'IR.





## Capitolo 3

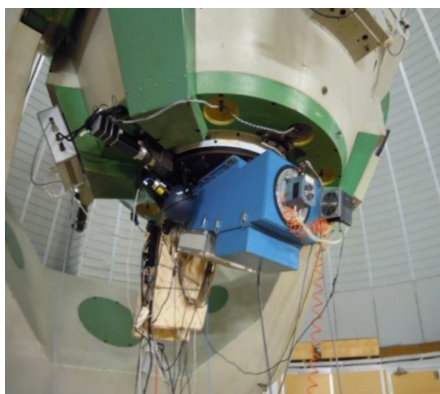
# Analisi spettroscopica

L'analisi spettroscopica è stata condotta su un set di due immagini della cometa interstellare 2I/Borisov prese la notte tra il 5 e il 6 Dicembre 2019 alle ore 4.07 al telescopio Copernico di Asiago di 182cm di diametro. Le immagini sono state acquisite quando la cometa era a  $q=2.007$  e  $\Delta=2.009$  AU (perielio l'8 Dicembre a 2.006 AU) con un magnitudine apparente  $m=16.58$  e massa d'aria di circa 2.5.

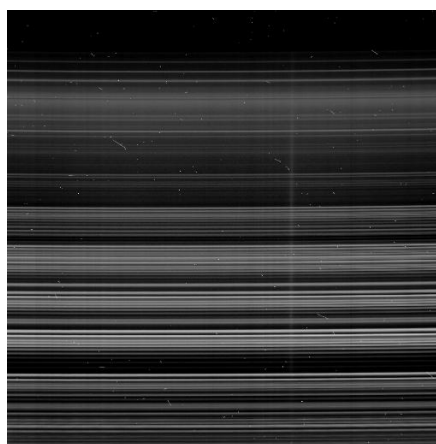
L'Asiago Faint Object Spectrograph and Camera (AFOSC) è lo strumento che abbiamo utilizzato che permette di effettuare spettroscopia. Esso è uno strumento di riduzione focale con un campo di vista di  $8.8 \times 8.8$  arcmin che garantisce spettroscopia di media risoluzione. In esso, tre ruote permettono la selezione di slit, filtri e grism. Ha una lunghezza focale di 159.35 mm, un range di lunghezze d'onda che va da 330 a 1100 nm e una risoluzione spettrale limite di 7350. Lo strumento è simile ad altri FOSC (per esempio al DFOSC del Danish Telescope a La Silla).

Per ottenere una corretta immagine scientifica, altrimenti influenzata dal passaggio attraverso la strumentazione e dall'osservazione da Terra, è necessario effettuare una riduzione con Midas. Per le calibrazioni effettuate sono state utilizzate diverse immagini di BIAS, FLAT, lampade e dell'analogo solare Land 102m1081. Esse sono state acquisite utilizzando una fenditura di 1.69 arcsec con risoluzioni che variano a seconda del grism in uso. Nel nostro caso sono stati adoperati i grism *VPH6* e *VPH7*. Il primo ha un range di lunghezze d'onda pari a 450 – 1000 nm (con  $\lambda_{cen} = 800$  nm), una dispersione di  $261 \text{ \AA/mm}$  e una risoluzione di 500. Il *VPH7* lavora tra 320 e 700 nm ( $\lambda_{cen} = 525$  nm) e ha dispersione e risoluzione simili al grism precedente, rispettivamente di  $295 \text{ \AA/mm}$  e 470.

Per la calibrazione in lunghezza d'onda sono state utilizzate le lampade al Neon e Hg-Cd, le quali hanno rispettivamente un range utile in  $\lambda$  di 570 – 880 nm per la prima e 360 – 1000 nm per la seconda. Entrambe le lampade mostrano circa 20 righe nello spettro. I dati principali relativi alle immagini sono riportati nella tabella seguente.



(a) Spettrografo AFOSC montato al Telescopio Copernico di Asiago



(b) Immagine della cometa 2I/Borisov non ancora ridotta

Figura 3.1: Strumento AFOSC montato sul telescopio Copernico di Asiago (a) e immagine dello spettro della cometa AF575936 (b)

Nome	Image type	Slit (arcsec)	Grism	Lampada	Exposure time (sec)
AF575874	calibrazione	1.69	VPH6	Ne	7.00
AF575875	calibrazione	1.69	VPH6	HgCd	7.00
AF575876	BIAS	1.69	VPH6	NO	0.00
AF575877	BIAS	1.69	VPH6	NO	0.00
AF575878	BIAS	1.69	VPH6	NO	0.00
AF575879	BIAS	1.69	VPH6	NO	0.00
AF575880	BIAS	1.69	VPH6	NO	0.00
AF575881	FLAT	1.69	VPH6	NO	2.00
AF575882	FLAT	1.69	VPH6	NO	2.00
AF575883	FLAT	1.69	VPH6	NO	2.00
AF575884	FLAT	1.69	VPH6	NO	2.00
AF575885	FLAT	1.69	VPH6	NO	2.00
AF575935	2I/Borisov	1.69	VPH7	NO	1800.00
AF575936	2I/Borisov	1.69	VPH6	NO	1800.00
AF575938	Land 102m1081	1.69	VPH7	NO	40.00
AF575939	Land 102m1081	1.69	VPH7	NO	160.00

Tabella 3.1: Dati principali di tutte le immagini

### 3.1 Sottrazione del bias

Il primo procedimento effettuato nella riduzione riguarda la sottrazione del bias, o zero-level image. L'immagine di bias consente di stimare il livello zero e il rumore del CCD. Quando si ha l'otturatore chiuso, infatti, un'esposizione di 0 secondi mostra ugualmente dei valori in conteggi con una distribuzione centrata sullo zero anche se ciò equivale a 0 foto-elettroni raccolti. Questo avviene perchè l'elettronica del CCD genera degli elettroni spuri per evitare di lavorare con numeri negativi. È necessario, quindi, conoscerne il valore e sottrarlo alle immagini con cui si lavora.

Dopo aver creato un catalogo con tutte le immagini scientifiche al suo interno, abbiamo analizzato i 5 bias con lo scopo di andare a scartare quelli con valori di media o deviazione standard significativamente diversi dagli altri e creare un'immagine di bias medio. Quest'ultimo passaggio serve per ridurre la deviazione standard associata ai bias, ottenendo poi una sottrazione più affidabile. La deviazione standard della media, infatti, decresce secondo il numero delle immagini utilizzate per calcolare il bias medio ( $\sigma_{\bar{x}} = \sigma_x / \sqrt{N}$  dove  $N$  e  $\sigma_x$  sono il numero e la deviazione standard delle immagini mediate e  $\sigma_{\bar{x}}$  la deviazione standard della media). L'immagine AF575879 è stata scartata per il calcolo del bias medio avendo un valore di deviazione standard significativamente diverso dagli altri, come si vede nella tabella seguente. Anche AF575880 non è stata considerata in quanto contiene due pixel dai conteggi molto elevati, probabilmente raggi cosmici, come si può notare dal valore massimo, riportato in tabella, che è quasi il doppio rispetto a quello dei primi 3 bias. In seguito, da un catalogo in cui abbiamo inserito le immagini delle lampade, dei flat, dell'analogo solare e della cometa 2I/Borisov, è stato sottratto il bias medio.

Bias	Massimo	Minimo	Media	Deviazione standard
AF575876	$1.521000 \times 10^3$	$1.485000 \times 10^3$	$1.502503 \times 10^3$	3.597776
AF575877	$1.521000 \times 10^3$	$1.485000 \times 10^3$	$1.502486 \times 10^3$	3.597776
AF575878	$1.521000 \times 10^3$	$1.485000 \times 10^3$	$1.502499 \times 10^3$	3.597776
AF575879	$9.578000 \times 10^3$	$1.485000 \times 10^3$	$1.502510 \times 10^3$	$1.062567 \times 10^1$
AF575880	$2.640000 \times 10^3$	$1.486000 \times 10^3$	$1.502511 \times 10^3$	4.140000
biasm	$1.512333 \times 10^3$	$1.493000 \times 10^3$	$1.502496 \times 10^3$	2.090663

Tabella 3.2: Conteggi dei bias

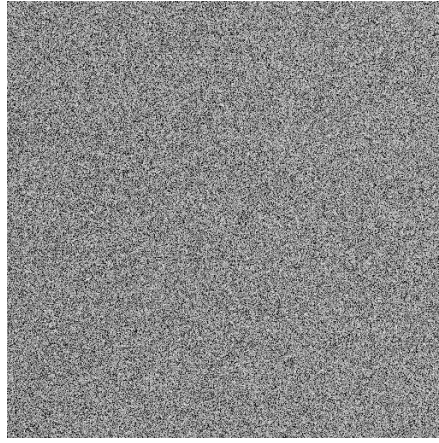


Figura 3.2: Bias medio

### 3.2 Correzione per flat-field

Prima di procedere con la correzione per flat-field abbiamo ruotato le immagini a cui abbiamo sottratto il bias con lo scopo di lavorare con lo spettro della cometa disposto orizzontalmente nell'immagine.

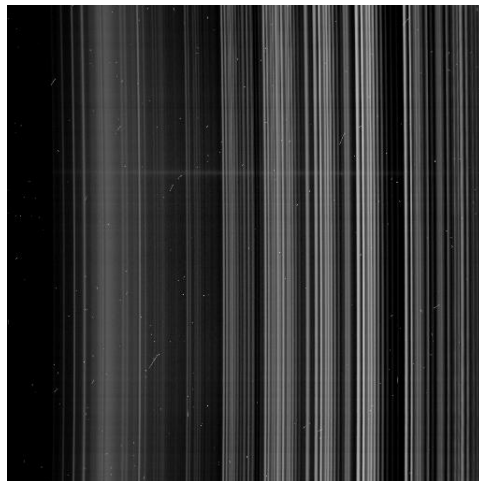


Figura 3.3: Immagine scientifica ruotata correttamente con bias sottratto

Nelle immagini scientifiche vogliamo che i conteggi in ogni zona siano proporzionali alla luce ricevuta. Questo non può avvenire senza la correzione per flat-field poichè ogni pixel del CCD ha una diversa sensibilità alla luce. Tale correzione tiene conto delle differenti risposte dei pixel tramite l'utilizzo di immagini di flat. Esse sono ottenute illuminando il CCD in maniera uniforme con diversi modi: per la spettroscopia si può usare una lampada interna allo strumento (internal flat) oppure basta puntare il telescopio verso la cupola chiusa (dome flat). Lo spettro risultante è una combinazione dello spettro continuo della lampada e della curva di risposta del CCD, a cui si aggiungono gli effetti della risposta non uniforme dei pixel. L'immagine scientifica viene poi divisa per il flat, normalizzato per evitare di ridurre drasticamente i conteggi e di perdere la corrispondenza lineare tra i conteggi misurati e la quantità di luce emessa dalla sorgente e incidente sul CCD.

Prima di tutto abbiamo controllato le 5 immagini di flat, come fatto in precedenza per i bias, per verificare che fossero tutte utilizzabili. Tutti i flat a disposizione risultavano compatibili tra loro, pertanto ne abbiamo calcolato la media. Abbiamo, poi, individuato la posizione in  $y$  dello spettro in una delle immagini scientifiche. Abbiamo poi selezionato sul flat medio la stessa zona e creato un flat monodimensionale che è stato poi riallargato per ottenere nuovamente un'immagine bidimensionale. In seguito, abbiamo diviso il flat medio per quest'ultimo flat bidimensionale espanso: il risultato è un flat normalizzato. Ognuna delle 6 immagini rimanenti (lampade, cometa e analogo solare) viene, quindi, divisa per il flat normalizzato.

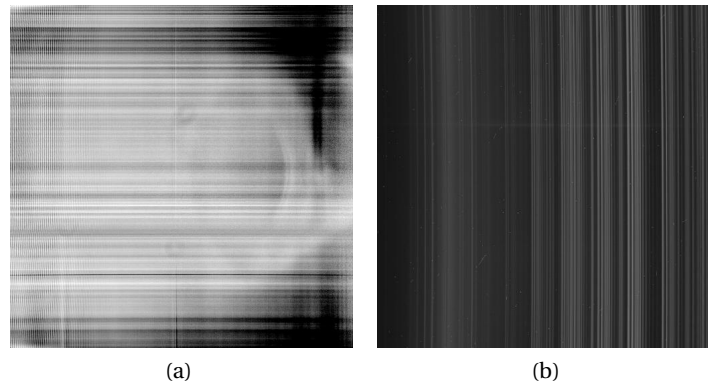


Figura 3.4: Flat normalizzato (a) e immagine scientifica corretta anche per flat field (b)

### 3.3 Calibrazione in lunghezza d'onda

Il passaggio successivamente effettuato è la calibrazione in lunghezza d'onda. Esso è necessario perchè le immagini digitali riportano per ogni pixel il valore in conteggi, il quale è proporzionale al numero di fotoni ricevuti. Nelle immagini acquisite con uno spettroscopio, in uno dei due assi c'è la dispersione e nell'altro la direzione spaziale lungo la fenditura. La calibrazione in lunghezza d'onda consente di trasformare il valore in pixel lungo l'asse della dispersione in lunghezze d'onda misurate in unità fisiche ( $\text{\AA}$ ). Per completare l'operazione va trovata la funzione che permette di ottenere la conversione da pixel a  $\text{\AA}$ , ossia la soluzione in dispersione ( $\text{\AA}/px$ ), confrontando le lunghezze d'onda note degli spettri di lampade a righe di emissione con quelle misurate.

Per fare questo abbiamo preso, per prima cosa, alcune righe al centro dell'immagine della lampada al Neon (tra le y 500 e 550) e le abbiamo usate per creare uno spettro monodimensionale, da confrontare con le lampade di confronto. Utilizzando una procedura di MIDAS e una lista contenente tutte le righe catalogate della lampada in questione, abbiamo fatto una ricerca di righe nello spettro monodimensionale osservato della lampada. La procedura ricerca tutte le righe al di sopra di una soglia di conteggi (da noi impostata a 30) e con una larghezza di 4 pixel. Così facendo, MIDAS ha individuato 35 righe per la lampada al Neon. In seguito abbiamo effettuato un ulteriore controllo individuando manualmente alcune righe, non saturate e selezionate sufficientemente spaziate all'interno dello spettro. Il riconoscimento manuale delle righe è stato possibile grazie ad uno spettro di paragone della stessa lampada di cui si conoscevano già le lunghezze d'onda di alcune righe. Lo spettro di paragone scelto deve essere stato creato nelle stesse condizioni con cui sono state prese le nostre lampade (stesso grism e stessa fenditura nello spettrografo AFOSC). Nell'*AFOSC Atlas of comparison spectra* ([http://www.oapd.inaf.it/images/pdf\\_asiago/at1\\_com\\_spectr.pdf](http://www.oapd.inaf.it/images/pdf_asiago/at1_com_spectr.pdf)), non abbiamo trovato tale spettro di paragone e ci siamo limitati a prenderne uno con le righe e i conteggi simili allo spettro monodimensionale da noi creato. Dopo aver salvato la calibrazione ottenuta, abbiamo ripetuto i passaggi anche per la lampada HgCd, individuando 19 righe.

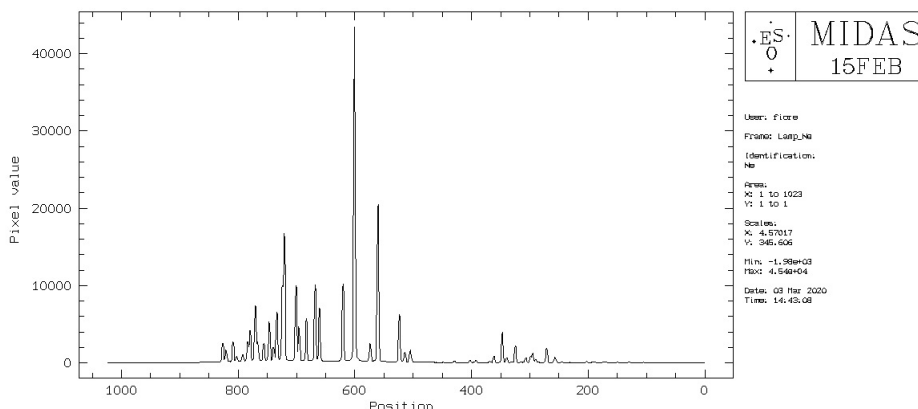


Figura 3.5: Spettro monodimensionale della lampada al Neon

### 3.4 Sottrazione del cielo

Per ottenere una corretta immagine scientifica bisogna sottrarre lo spettro del cielo che influenza le immagini aumentando considerevolmente i conteggi. Questo spettro è dovuto principalmente all'illuminazione delle zone abitate o a luce atmosferica e può avere righe molto marcate quali, ad esempio, quelle causate dalle luci al sodio o a lampade di mercurio. Tra le altre righe troviamo le bande dell'OH e le righe di emissione dell'ossigeno atmosferico (5577, 6300 e 6364 Å). Nella figura 3.4 nella pagina precedente (b) si può notare che tutte le righe verticali sono dovute alle emissioni del cielo.

Per prima cosa abbiamo selezionato la zona in cui è maggiormente visibile lo spettro lungo l'asse della dispersione. Una procedura di MIDAS prende la zona selezionata e ne calcola la media restituendoci un profilo pseudogaussiano della larghezza dello spettro lungo l'asse spaziale, rappresentato nella figura sottostante. Questo serve ad evidenziare l'estensione spaziale dello spettro della cometa.

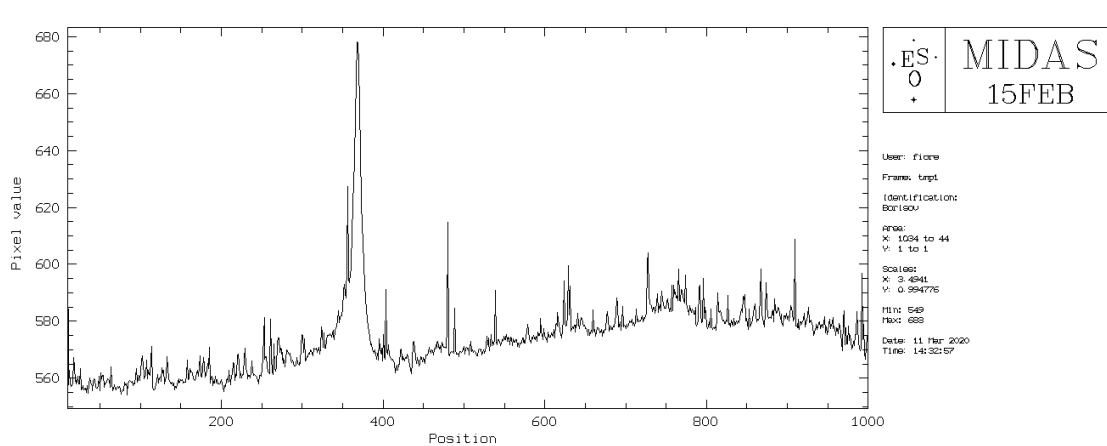


Figura 3.6: Profilo pseudogaussiano dello spettro selezionato lungo l'asse della dispersione

Una volta individuati centro (368.4) e FWHM (8.4) del profilo pseudogaussiano (Fig. 3.6), sommiamo un numero di righe pari a 3 volte la FWHM per ottenere il nostro spettro monodimensionale della cometa, rappresentato in figura 3.8 (a). A questo punto possiamo procedere a selezionare lo stesso numero di righe per estrarre uno spettro monodimensionale del cielo. Selezioniamo le aree lungo la direzione spaziale, sopra (tra le righe 174.8 e 200) e sotto (tra 900 e 925.2) alla cometa, che andranno considerate come cielo da sottrarre. In questa selezione bisogna fare attenzione a non considerare come cielo zone troppo vicine alla cometa a causa della presenza della chioma. Per ognuna delle due aree abbiamo sommato tutte le righe ottenendo due profili monodimensionali: il cielo superiore e il cielo inferiore. A questo punto abbiamo mediato i due profili trovando così un unico spettro medio del cielo, rappresentato nella figura sottostante.

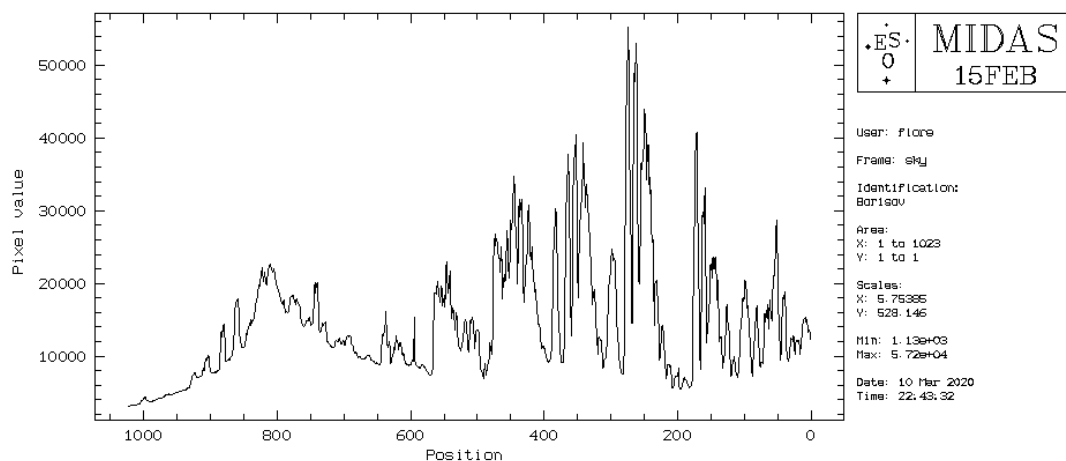


Figura 3.7: Contributo del cielo

Prima di effettuare la sottrazione del cielo controlliamo che ci sia un buon allineamento tra i due profili testando degli spostamenti di qualche pixel tra l'uno e l'altro. Il miglior allineamento viene ottenuto quando le righe più intense del cielo vengono ridotte considerevolmente nello spettro finale. Abbiamo ottenuto un buon allineamento con uno "shift" di +2 pixel nello spettro del cielo. In Fig. 3.8 (b) è riportato lo spettro della cometa a cui è stato sottratto il contributo del cielo.

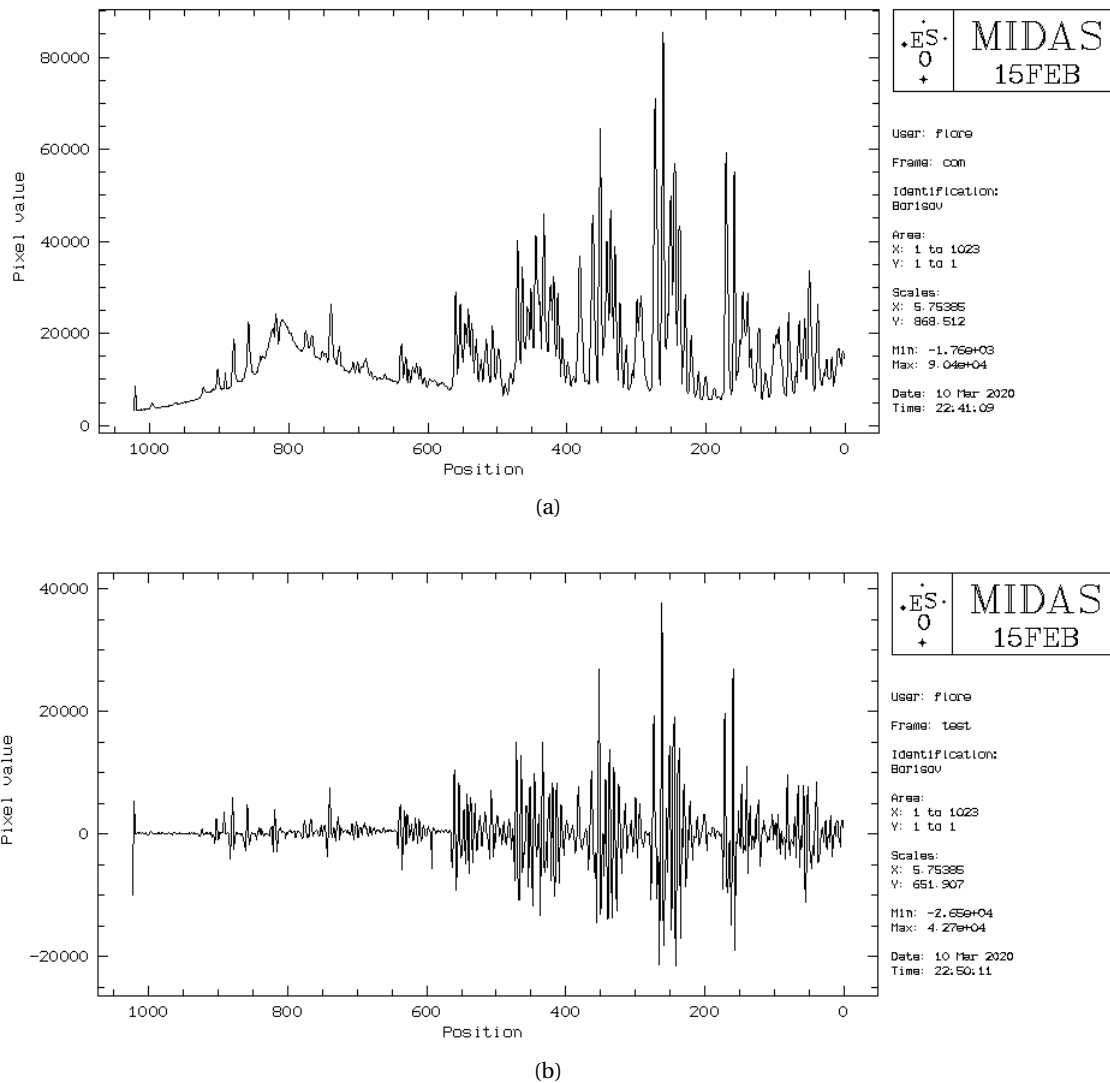


Figura 3.8: (a) Spettro monodimensionale della cometa 21/Borisov; (b) spettro della cometa 21/Borisov a cui è stato sottratto il cielo shiftato

Successivamente, all'ultimo spettro ottenuto abbiamo applicato la calibrazione in lunghezza d'onda della lampada al Neon, descritta nella sezione 3.3 a pagina 36. Per fare questo abbiamo utilizzato una procedura di MIDAS che ricampiona l'immagine dello spettro associando ad ogni pixel il valore in lunghezza d'onda corrispondente salvato nel file di calibrazione calcolato precedentemente (Sec. 3.3 a pagina 36). Lo spettro finale è stato tagliato tra 5000 e 8000 Å poichè al di fuori di questi valori lo spettro appare molto rumoroso, probabilmente a causa della presenza di alcune "features" che non sono state rimosse o del *fringing*, un effetto aggiuntivo di "sbavatura" prodotto probabilmente durante l'interpolazione per via di leggerissime variazioni dello spessore del CCD. La presenza di picchi alti e bassi molto vicini tra loro potrebbero, infatti, indicare che il cielo non è stato sottratto perfettamente.

Per provare a ridurre il *fringing* o le righe del cielo residue, abbiamo tentato uno *smoothing*, ossia l'applicazione di un filtro che evidenzia pattern significativi e ne riduce il rumore. Noi abbiamo fatto lo *smoothing* utilizzando una "threshold" di 100 conteggi e una larghezza di 5 pixel. Lo spettro finale tra 5000 e 8000 Å è raffigurato in Fig. 3.10 ed evidenzia una leggera incurvatura dello spettro, imputabile probabilmente alla presenza di polvere.

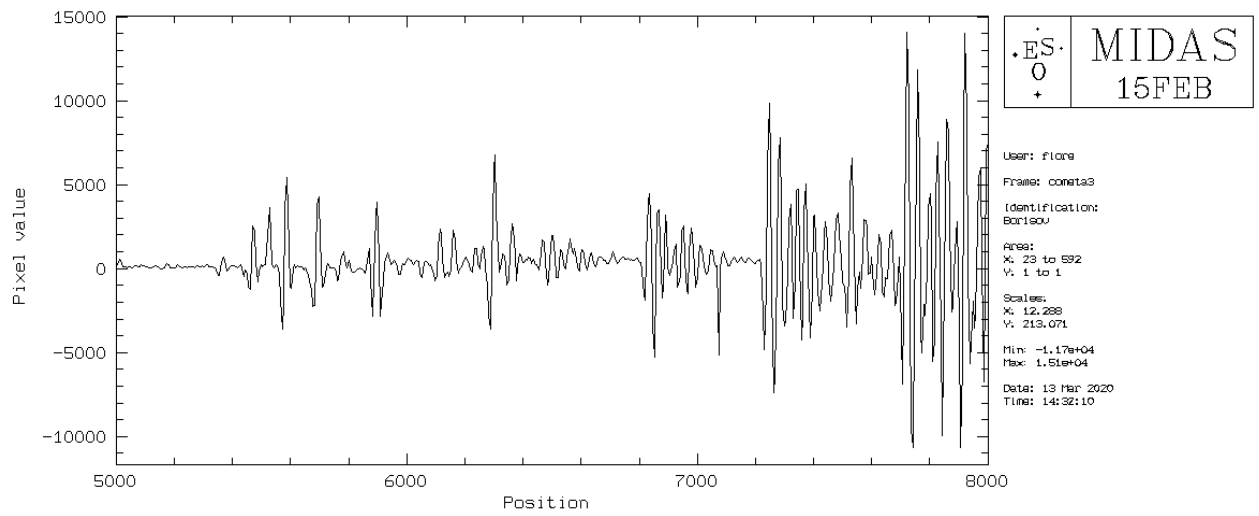


Figura 3.9: Spettro di 2I/Borisov calibrato in lunghezza d'onda e tagliato tra 5000 e 8000 Å senza aver effettuato lo smoothing

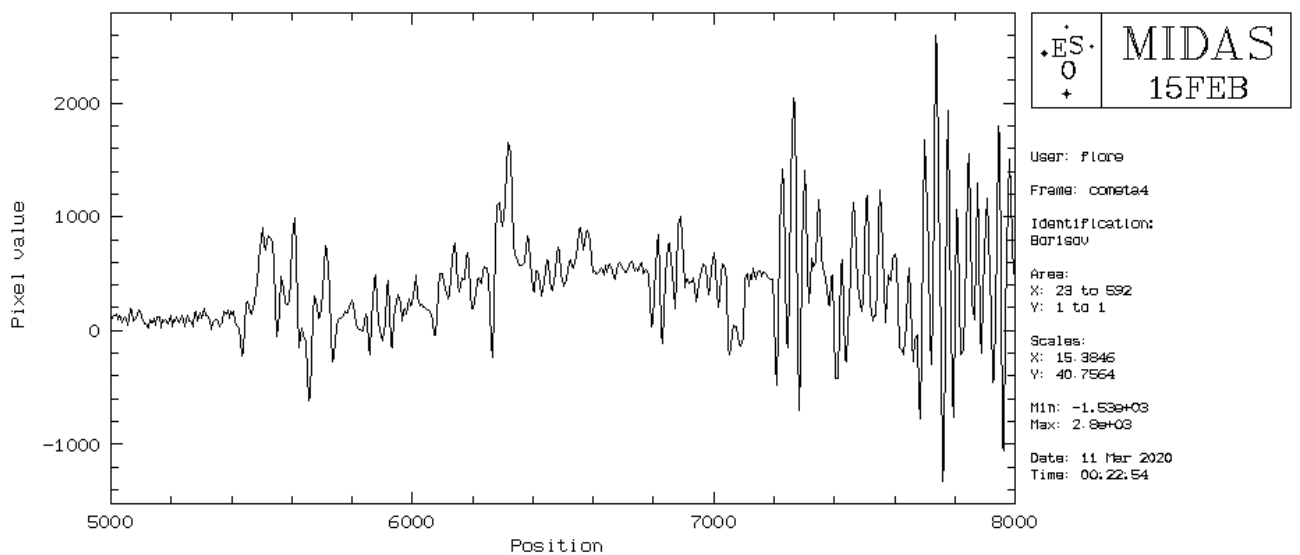


Figura 3.10: Spettro finale della cometa 2I/Borisov tra 5000 e 8000 Å





## Capitolo 4

# Discussione dei risultati e conclusioni

L'interazione con un pianeta gigante in un sistema stellare può portare all'espulsione nel mezzo interstellare di alcuni planetesimi o corpi minori. Nel mezzo interstellare questi corpi non sono soggetti al controllo di nessuna stella, il cui passaggio ravvicinato può però immetterli in altri sistemi stellari, tra cui il Sistema Solare. La possibilità di analizzare oggetti interstellari, la cui esistenza è stata teorizzata già da alcuni decenni, ha aperto nuovi orizzonti nello studio dei processi fisici e chimici che coinvolgono questi corpi nei sistemi stellari di provenienza. Il passaggio nel Sistema Solare di corpi interstellari, probabilmente composti da materiale primordiale della nebulosa stellare di provenienza, permette anche lo studio dell'evoluzione termica e dinamica del loro luogo d'origine. Per questi motivi, in seguito alla scoperta di 1I/Oumuamua, anche 2I/Borisov riveste una notevole importanza nello studio dei corpi che attraversano il nostro Sistema Solare.

Il 30 Agosto 2019 Gennady Borisov scopre quella che viene ritenuta essere la prima cometa interstellare transitante nel Sistema Solare. Dalla sua scoperta, annunciata l'11 Settembre 2019, sono stati condotti numerosi studi sulla cometa, riassunti nel capitolo 2 di questa tesi. L'orbita è stata trovata essere altamente iperbolica (eccentricità di circa  $3.38 \pm 0.02$ ) con una velocità in eccesso di  $32 \text{ km/s}$ . All'epoca della scoperta 2I/Borisov mostrava un'attività cometaria dominata dalla polvere con un indice di colore leggermente arrossato che ricorda quello degli asteroidi di tipo D e delle comete a lungo periodo. Dalle osservazioni è stato possibile intuire che la cometa fosse attiva anche 100 giorni prima della sua scoperta, quando si trovava a circa 4.5 AU dal Sole. Il nucleo sembra avere un raggio di 0.4 km. Dal punto di vista chimico, 2I/Borisov sembra essere una cometa "depleted" della tassonomia di A'Hearn, ossia sembra contenere meno  $C_2$  rispetto alla maggior parte delle comete osservate. Altre righe individuate sono quelle del CN e la transizione proibita a  $6300 \text{ \AA}$  dell'ossigeno neutro. I tassi di produzione di queste molecole, riportati nel paragrafo 2.2 a pagina 26, ci dicono che 2I/Borisov mostra quantità di CN tipiche delle comete del Sistema Solare ma che manca di  $C_2$  e che potrebbe avere un tasso di perdita d'acqua di  $19 \text{ kg/s}$ . Il ghiaccio d'acqua, però, non è stato ancora osservato e, secondo alcune ipotesi, 2I/Borisov continuerà ad apparire priva durante la sua orbita nonostante l'individuazione della riga a  $6300 \text{ \AA}$  dell'ossigeno neutro e del tasso di produzione dell'OH stimato ( $Q = 2.0 \times 10^{27} \text{ molecole/s}$ ), entrambi prodotti della fotodissociazione dell'acqua. Dunque, 2I/Borisov potrebbe essere un oggetto post sequenza principale (PMSO) ricco in carbonio originato dal materiale espulso da una stella dopo la fase AGB. In successive osservazioni 2I/Borisov ha mostrato una pendenza spettrale più piatta rispetto allo spettro solare, probabilmente a causa della perdita di materiale organico per opera della sublimazione.

L'analisi spettroscopica descritta in questa tesi è stata condotta principalmente su un'immagine scientifica presa la notte tra il 5 e il 6 Dicembre 2019 alle ore 4.07 (tempo di esposizione di 1800 s) al telescopio Copernico di 182 cm di diametro di Asiago, quando la cometa si trovava a un distanze eliocentrica e geocentrica rispettivamente di circa 2.007 e 2.009 AU (il perielio è stato l'8 Dicembre 2019 con  $q = 2.006 \text{ AU}$ , il perigeo il 28 Dicembre 2019 a  $\Delta \approx 1.4$ ). All'epoca dell'osservazione 2I/Borisov era visibile con una magnitudine apparente di 16.58 e una massa d'aria di circa 2.5.

Per studiare correttamente lo spettro della cometa è stato necessario ridurlo per eliminare gli effetti dell'atmosfera terrestre e della strumentazione. Per fare questo abbiamo utilizzato solamente le immagini prese con il grism VPH6 che garantisce una buona risoluzione spettrale. La riduzione è stata effettuata utilizzando immagini di bias, di flat field e di lampade al Ne e Hg-Cd. Per prima cosa abbiamo sottratto il

bias medio dall'immagine scientifica, dai flat e dalle lampade per eliminare i conteggi che il CCD produce a otturatore chiuso. Successivamente abbiamo diviso le immagini scientifiche e le lampade per il flat medio normalizzato con lo scopo di avere conteggi proporzionali ai fotoni effettivamente ricevuti dal CCD. Il passo immediatamente successivo è stato quello di creare una calibrazione in lunghezza d'onda utilizzando la lampada al Neon in modo da ottenere una corrispondenza lungo l'asse della dispersione tra pixel e lunghezze d'onda. L'applicazione della calibrazione in lunghezza d'onda è stata effettuata dopo aver ottenuto il miglior risultato possibile della sottrazione del cielo. La presenza del cielo, infatti, tende ad aumentare considerevolmente i conteggi dello spettro. Per ottenere lo spettro finale è stato fatto uno *smoothing* che migliora leggermente la qualità dello spettro. Nel rosso, infatti, lo spettro è affetto da un rumore elevato probabilmente a causa del fringing e della presenza di cielo molto intenso, dovuto anche al momento di acquisizione dell'immagine, molto vicino all'alba.

Dallo spettro finale ottenuto (Fig. 3.10 a pagina 39), si può notare che il rumore rimane ancora abbastanza elevato e ciò impedisce un'analisi dettagliata delle possibili bande presenti. Purtroppo la cometa è stata osservata in condizioni critiche, con un'airmass molto elevata e al sorgere del Sole, condizioni che hanno influito notevolmente sul risultato finale. In particolare, è risultata particolarmente difficoltosa l'eliminazione del contributo del cielo dallo spettro, soprattutto nella regione spettrale di maggiori lunghezze d'onda. Il rumore elevato dello spettro è inoltre dovuto, oltre alla presenza di cielo, anche a effetti di fringing. Tutto ciò porta ad un rapporto segnale-rumore piuttosto basso che influisce sull'individuazione di possibili righe e bande molecolari. Nonostante questo, nello spettro finale sembra visibile una caratteristica probabilmente dovuta al  $C_2$  (banda di Swan) intorno ai 5100 Å. I conteggi di questa banda sono molto bassi, ma potrebbero essere consistenti con altri risultati per 2I/Borisov che la classificano come una cometa "depleted" in  $C_2$  secondo la tassonomia di A'Hearn. Tra 5600 e 6000 Å sembrerebbero esserci delle righe di  $NH_2$  e  $C_2$  ma la presenza di cielo unita al fringing non permettono una loro chiara rilevazione. La presenza delle righe di  $NH_2$ , unita ad altri risultati che spiegano l'individuazione del CN a 3880 Å nella cometa, potrebbe indicare che 2I/Borisov sia un oggetto ricco in carbonio o azoto formatosi dalla condensazione del materiale espulso da una stella AGB (PMSO). L'individuazione di righe del litio farebbe propendere per la seconda ipotesi. Sembrano presenti anche righe a 6300 e 6364 Å che nella cometa sarebbero dovute a transizioni proibite dell'ossigeno neutro. Tuttavia, data l'intensità del cielo notturno e la difficoltà della sua eliminazione, tali righe potrebbero essere dovute in buona parte all'ossigeno atmosferico. L'andamento generale dello spettro è abbastanza piatto, in accordo con le analisi più recenti di questa cometa. Sembra esserci una leggera curva dello spettro tra i 6000 e gli 8000 Å, probabilmente dovuta alla presenza di polvere.

Per concludere, questo lavoro di tesi mi ha dato la possibilità di affrontare per la prima volta la riduzione di spettri cometari, di solito piuttosto complessa e ancor più in questo caso a causa delle condizioni al limite dell'osservabilità. Soprattutto mi ha dato l'opportunità di poter studiare un oggetto straordinario quale è la cometa 2I/Borisov, la prima cometa interstellare, che non tornerà mai più nel nostro Sistema Solare.

# Bibliografia

- [1] K. Altwegg, H. Balsiger, S.A. Fuselier et al. «Cometary Chemistry and the Origin of Icy Solar System Bodies: The View after Rosetta». In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 57 (agosto 2019), pp. 113-155, DOI: 10.1146/annurev-astro-091918-104409
- [2] K.S. Krishna Swamy et al. «Physics of Comets» (3rd Edition, 2010). Pubblicato da *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, DOI: 10.1142/7537
- [3] M.J. Mumma, S.B. Charnley et al. «The Chemical Composition of Comets-Emerging Taxonomies and Natal Heritage». In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 49 (set. 2011), issue 1, pp. 471-524, DOI: 10.1146/annurev-astro-081309-130811
- [4] A. Higuchi, E. Kokubo et al. «Hyperbolic Orbits in the Solar System: Interstellar Origin or Perturbed Oort Cloud Comets?». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Advance Access*, nov. 2019, DOI: 10.1093/mnras/stz3153
- [5] M.F. A'Hearn et al. «Comets as Building Blocks». In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 49 (set. 2011), issue 1, pp. 281-299, DOI: 10.1146/annurev-astro-081710-102506
- [6] T.M. Eubanks et al. «Is Interstellar Object 2I/Borisov a Stardust Comet? Predictions for the Post perihelion Period». Submitted to *Astrophysical Journal Letters* (dic. 2019), eprint arXiv: 1912.12730
- [7] C.A.L. Bailer-Jones, D. Farnocchia, Q. Ye, K.J. Meech, M. Micheli et al. «A search for the origin of the interstellar comet 2I/Borisov». In: *Astronomy & Astrophysics*, vol. 634 (feb. 2020), id.A14, DOI: 10.1051/0004-6361/201937231
- [8] P.A. Dybczyński, M. Królikowska, R. Wysoczańska et al. «Kruger 60 as a home system for 2I/Borisov – a case study» (set. 2019). Eprint arXiv: 1909.10952
- [9] B. Yang, M.S.P. Kelley, K.J. Meech, J.V. Keane, S. Protopapa, S.J. Bus et al. «Searching for Water Ice in the Coma of Interstellar Object 2I/Borisov». In: *Astronomy & Astrophysics*, vol. 634 (feb. 2020), id.L6, DOI: 10.1051/0004-6361/201937129
- [10] A.J. McKay, A.L. Cochran, N. Dello Russo, M.A. DiSanti et al. «Detection of a Water Tracer in Interstellar Comet 2I/Borisov». In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 889 (gen. 2020), issue 1, id.L10, DOI: 10.3847/2041-8213/ab64ed
- [11] T. Kareta, J. Andrews, J.W. Noonan, W.M. Harris, N. Smith, P. O'Brien, B.N.L. Sharkey, V. Reddy, A. Springmann, C. Lejoly et al. «Carbon Chain Depletion of 2I/Borisov». In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 889 (feb. 2020), issue 2, id.L38, DOI: 10.3847/2041-8213/ab6a08
- [12] D. Jewitt, J. Luu et al. «Initial Characterization of Interstellar Comet 2I/2019 Q4 (Borisov)». In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 886 (dic. 2019), issue 2, id.L29, DOI: 10.3847/2041-8213/ab530b
- [13] P. Guzik, M. Drahus, K. Rusek, W. Waniak, G. Cannizzaro, I. Pastor-Marazuela et al. «Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov». In: *Nature Astronomy*, vol. 4 (gen. 2020), pp. 53-57, DOI: 10.1038/s41550-019-0931-8

- [14] D. Jewitt, M. Hui, Y. Kim, M. Mutchler, H. Weaver, J. Agarwal et al. «The Nucleus of Interstellar Comet 2I/Borisov». In: *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 888 (gen. 2020), issue 2, id.L23, DOI: 10.3847/2041-8213/ab621b
- [15] V. Orfino et al. «I corpi minori del Sistema Solare: comete e oggetti transnettuniani». Dispense n.8 del corso di Planetologia, Corso di Laurea Magistrale in Fisica dell'Università del Salento, agosto 2011, <https://www.unisalento.it/documents/20152/719789/CorpiMinori3.pdf/3528ca2d-095e-1810-3b08-624d1316a998?version=1.0&download=true>
- [16] C. Elidoro et al. «I corpi minori del Sistema Solare» (1996), [www.castfvg.it/Elidoro%20Claudio/Geocities/corpinorini/cm\\_cometmorfologia.html](http://www.castfvg.it/Elidoro%20Claudio/Geocities/corpinorini/cm_cometmorfologia.html)