

**Università degli Studi di Padova**

---

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

**Analisi spettroscopica delle  
comete 12P, 32P e C/2023 H2**

**Relatore:**

Prof.ssa Monica Lazzarin

**Correlatore:**

Dott.ssa Alessandra Mura

**Laureando:**

Nicola Garbin

---

ANNO ACCADEMICO 2023/2024



## ABSTRACT

Questa tesi prevede l'analisi degli spettri delle chiome delle comete 12P/Pons-Brooks, 32P/Comas Solà e C/2023 H2 (Lemmon) nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 3200 e 7900 Å . Le comete sono state osservate spettroscopicamente la notte del 12/11/2023 ad Asiago tramite il telescopio Galileo da 122 cm e lo spettrografo Boller & Chivens. Dopo la riduzione degli spettri con il software IRAF, ho individuato specifiche bande e righe di emissione negli spettri e ho confrontato tali emissioni tenendo conto delle diverse caratteristiche delle tre comete. Lo spettro della cometa C/2023 H2 è risultato essere quello con più bande di radicali neutri ben identificabili, in virtù di una minore distanza eliocentrica e una maggiore attività cometaria. La cometa 12P/Pons-Brooks mostra un rapporto segnale-rumore maggiore e, rispetto allo spettro della cometa C/2023 H2, meno bande identificabili poiché si trovava, all'epoca di osservazione, più distante dal Sole. Lo spettro della cometa 32P/Comas Solà è completamente dominato dal rumore, con l'impossibilità di identificare alcuna emissione del gas.

Nel Capitolo 1 viene fatta un'introduzione generale sulle comete e sugli spettri cometari nella regione ottica. Vengono inoltre presentati i diversi gruppi dinamici in cui le comete possono essere classificate e le proprietà fisiche sia dei nuclei cometari che delle comete quando sono attive. Nel Capitolo 2 vengono presentati la strumentazione utilizzata durante l'osservazione, gli spettri delle comete e le diverse immagini di calibrazione. Si discutono inoltre i passaggi effettuati nella riduzione delle immagini con IRAF. Infine, nel Capitolo 3, gli spettri cometari ridotti vengono presentati, analizzati e confrontati tra di loro.



# INDICE

<b>CAPITOLO 1</b> .....	<b>7</b>
1.1 PROPRIETÀ FISICHE DELLE COMETE.....	7
1.2 ORIGINE DELLE COMETE E LORO CLASSIFICAZIONE .....	10
1.3 ORBITE COMETARIE ED EVOLUZIONE TERMICA DEL NUCLEO .....	12
1.4 SPETTRI COMETARI NELL’OTTICO .....	14
<b>CAPITOLO 2</b> .....	<b>18</b>
2.1 STRUMENTAZIONE E DATASET .....	18
2.2 ELABORAZIONE DATI CON IRAF .....	22
2.2.1 PARTE INIZIALE DELLA RIDUZIONE DEGLI SPETTRI DELLE COMETE 12P, 32P E C/2023 H2 .....	24
2.2.2 PARTE FINALE DELLA RIDUZIONE DEGLI SPETTRI DELLE COMETE 12P E C/2023 H2.....	30
2.2.3 PARTE FINALE DELLA RIDUZIONE DELLO SPETTRO DELLA COMETA 32P .....	34
<b>CAPITOLO 3</b> .....	<b>36</b>
3.1 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	36
3.2 CONCLUSIONI.....	42
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>44</b>



# CAPITOLO 1

Le comete sono fenomeni che hanno affascinato l'uomo sin dai tempi più antichi. Storicamente associate a calamità naturali, il loro passaggio è stato spesso documentato, permettendo successivamente di ricostruirne l'evoluzione orbitale. Fu nel XVI secolo che le comete iniziarono ad essere considerate come corpi celesti, in seguito alle osservazioni della cometa C/1577 V1 (la Grande Cometa del 1577) da parte di Tycho Brahe. Newton, e in seguito Halley, alla fine del XVII secolo, conclusero che le comete sono oggetti con orbite chiuse e dunque appartenenti al Sistema Solare, soggetti alle stesse leggi fisiche che determinano il moto planetario.

Oggi giorno le comete sono classificate come “corpi minori del Sistema Solare”, assieme ad asteroidi, centauri, troiani e oggetti trans-nettuniani (tranne i pianeti nani). Sono oggetti piccoli, generalmente di dimensioni inferiori ai 20-50 km (A'Hearn, 2011), composti da ghiacci, soprattutto ghiaccio d'acqua, rocce e polveri. All'avvicinamento al Sole, tali corpi iniziano a scaldarsi per effetto dell'irraggiamento solare. Ciò porta alla sublimazione dei gas congelati al loro interno, col conseguente rilascio del materiale nello spazio attraverso getti ed esplosioni dalla superficie del nucleo cometario. Le particelle più piccole di polvere vengono trascinate assieme al gas e quindi espulse ad arricchire l'atmosfera che circonda il nucleo, detta “chioma”. L'interazione della chioma con il vento e la radiazione solari porta alla formazione delle caratteristiche code. In presenza di chioma e code, una cometa è detta “attiva”.

## 1.1 PROPRIETÀ FISICHE DELLE COMETE

### Il nucleo cometario

In seguito ad un'analisi delle temperature di sublimazione delle principali molecole costituenti la chioma cometaria, F. L. Whipple propose, nel 1950, un nuovo modello di nucleo cometario, il modello della ‘palla di neve sporca’, che si contrapponeva a quello maggiormente accreditato all'epoca (Whipple, 1950; Elidoro, 1996). Tale visione del nucleo cometario come un oggetto compatto, monolitico, composto principalmente da ghiaccio e materiale non volatile, sostituì l'idea precedente che vedeva il nucleo come un aggregato di materiale meteoritico tenuto assieme dalla gravità. In seguito all'arrivo della sonda *Giotto* sulla cometa di Halley nel 1986, il modello di Whipple fu rivisitato alla luce delle nuove informazioni ricavate sulla struttura e composizione dei nuclei cometari. Oggi si pensa ai nuclei delle comete come a corpi la cui forza fisica è controllata dalla componente di roccia e polveri e la cui superficie è per la maggior parte inattiva.

I nuclei cometari sono corpi di forma irregolare, molto scuri e con un basso valore di densità. A differenza dei pianeti, non presentano alcuna differenziazione radiale di composizione interna. Ciò si è osservato dai rapporti riga-continuo, che rimangono invariati in passaggi successivi della stessa cometa al perielio, con l'esposizione di strati nucleari via via più interni. Anche i rapporti tra le abbondanze atomiche e molecolari non cambiano con l'età della cometa e dunque con la profondità nel nucleo.

All'avvicinarsi di una cometa al perielio, l'irraggiamento solare provoca un aumento della temperatura nelle regioni superficiali esposte. A causa dell'alta porosità del nucleo meteorico (A'Hearn, 2011), le comete sono caratterizzate da una bassa conduttività termica, che limita la trasmissione del calore dagli strati superficiali a quelli più interni. Inoltre, l'energia ricevuta viene perlopiù utilizzata per la sublimazione dei ghiacci, contribuendo a mantenere freddo l'interno del nucleo (Elidoro, 1996). Quando il nucleo si trova sufficientemente distante dal Sole, oltre le 3 AU, non vi è alcuna chioma, o la chioma è estremamente debole e la cometa non presenta emissioni da parte del gas, limitandosi a riflettere la luce solare. Essendo i nuclei cometari dei corpi molto piccoli e con bassissimi valori di albedo, diventa molto difficile la loro diretta osservazione a grandi distanze, in assenza di attività cometaria. A distanze eliocentriche minori, dove sarebbe di più facile osservazione, il nucleo cometario è completamente avvolto dalla chioma, estremamente più brillante, rendendolo impossibile da risolvere otticamente.

## La chioma e le code

La chioma è l'atmosfera che si forma attorno al nucleo di una cometa quando si avvicina al Sole, solitamente oltre le 5 AU, ed è dovuta alla sublimazione dei ghiacci cometari per effetto della radiazione solare incidente. I gas sublimati trascinano con sé i grani di polvere più piccoli, che meglio riescono a sfuggire all'attrazione gravitazionale del nucleo. Le polveri cometarie sono formate da silicati e composti organici, mentre la costituente principale dei ghiacci è l'acqua, seguita dal CO. L'attività del nucleo è misurata dal tasso di produzione  $Q$ , che dà il numero di molecole (solitamente espresso in moli) emesse dal nucleo per unità di tempo. La dimensione della chioma varia con la distanza eliocentrica: più la cometa è vicina al Sole, maggiore è l'irraggiamento solare e dunque il calore fornito al nucleo cometario. Segue dunque una maggiore quantità di gas sublimato, al quale si aggiunge la polvere, che porta all'estensione della chioma. Viceversa, quanto la cometa è distante dal Sole, la chioma tende a impoverirsi di materiale, restringendosi fino a sparire, solitamente oltre le 8 AU. Per una cometa non attiva, la magnitudine  $m$  dipende solamente dalla distanza eliocentrica  $r$  e dalla distanza dall'osservatore  $\Delta$ , secondo la relazione:

$$m = m_0 + 5 \log \Delta + 5 \log r \quad (1.1)$$

In presenza di chioma, la cometa diventa ben visibile in cielo aumentando di molto la propria luminosità. L'interazione tra la chioma e la radiazione solare porta ad intense emissioni da parte della cometa. I gas emettono per fluorescenza in seguito ad eccitazione radiativa, mentre le polveri, nel visibile, riflettono la radiazione solare. L'emissione termica delle polveri si può osservare nella regione spettrale del medio-lontano infrarosso. La magnitudine di una cometa attiva dipende non solo dalla distanza eliocentrica  $r$  e dalla distanza dall'osservatore  $\Delta$ , ma anche da un parametro  $n$ :

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

Il valore di  $n$  è generalmente compreso tra 2.5 e 11.5. Solitamente varia da cometa a cometa e a volte anche per la stessa cometa. È un parametro che viene stimato empiricamente e di difficile predizione, a causa della forte variabilità dei fenomeni cometari.

La chioma di una cometa può essere suddivisa in tre strati concentrici, approssimativamente sferici:

- la chioma interna, che si estende fino a  $10^4$  km ed è la zona di produzione per fotodissociazione dei radicali neutri osservati;
- la chioma intermedia (o radicale), che arriva fino  $10^5$  km e costituisce la regione di espansione delle specie prodotte dalla fotodissociazione;
- la chioma atomica (o UV), che è la zona di fotodissociazione e fotoionizzazione dei radicali neutri e ha dimensioni fino a  $10^7$  km.

È inoltre presente una chioma di idrogeno, molto più estesa delle altre, che emette alla lunghezza d'onda della Lyman-alpha ( $1216 \text{ \AA}$ ). La chioma interna, mantenuta in equilibrio termico dalle frequenti collisioni, è costituita dalle molecole madri, ovvero le specie chimiche che costituiscono i ghiacci dei nuclei cometari e che, una volta espulse, vengono rapidamente scisse nelle molecole figlie dall'interazione con i fotoni solari più energetici. È possibile accedere alla regione più interna della chioma tramite osservazioni nel lontano infrarosso e nel radio, dove si osservano negli spettri le bande vibrazionali e roto-vibrazionali di molte molecole madri.

Oltre alla chioma, le comete presentano un'ulteriore caratteristica distintiva: le code. Le code si presentano quando la cometa è attiva, solitamente a distanze eliocentriche minori di 2-3 AU e si formano dall'interazione del vento solare con i gas e le polveri della chioma cometaria. Spettroscopicamente si possono individuare due tipi principali di code: la coda di tipo I, o di ioni, e la coda di tipo II, o di polvere. La coda di tipo I è costituita dagli ioni risultanti dalla fotoionizzazione, ad opera della radiazione solare, delle molecole di gas nella chioma cometaria. Il vento solare genera campi magnetici variabili nel tempo e gli ioni nella chioma si muovono lungo le linee di forza di tali

campi, venendo allontanati a formare una coda di plasma (Biermann, 1951). A causa della variabilità dei campi magnetici, l'aspetto della coda di polveri cambia rapidamente. Questa coda si estende fino a  $10^7$ - $10^8$  km dal nucleo ed è diretta nella direzione opposta al Sole, spinta dalle particelle cariche del vento solare. Appare di colore blu per l'emissione per fluorescenza dello ione  $\text{CO}^+$ , che domina nel visibile. La coda di polveri, o di tipo II, si mostra invece di colore giallastro, dovuto alla riflessione della luce solare da parte dei grani di polvere che costituiscono questa coda. Si forma dall'interazione tra la chioma e la pressione esercitata dalla radiazione solare, che spinge le particelle di polvere in direzione opposta al Sole, e si estende fino a  $10^7$  km dal nucleo. Solo le particelle di dimensione più piccola ( $d \lesssim 1 \mu\text{m}$ ), vengono allontanate dalla chioma a costituire la coda di tipo II. Grani già più grandi formano invece un'anticoda. L'anticoda viene chiamata tale perché appare diretta verso il Sole, anche se, in realtà, la sua dimensione apparente dipende dalla geometria del sistema Sole-cometa-Terra (Swamy, 1986). In comete brillanti, come la Hale-Bopp, è stata individuata anche una coda sottile e lunga, sovrapposta alla coda di polvere, formata da atomi di sodio neutro, che emette alle lunghezze d'onda del doppietto del sodio 5890, 5896 Å (Cremonese et al., 1997). Questa coda potrebbe esser dovuta alla dissociazione di molecole contenenti sodio presenti nella chioma cometaria. Gli atomi di sodio verrebbero poi spinti in direzione antisolare dalla pressione di radiazione. Fu anche osservata, per la prima volta, nel 2007, una coda di atomi di ferro nella cometa McNaught 2006P1 (Fulle et al., 2007).

## 1.2 ORIGINE DELLE COMETE E LORO CLASSIFICAZIONE

Le comete sono planetesimi formatesi circa 4.6 miliardi di anni fa a distanze eliocentriche prossime alle posizioni attuali di Urano e Nettuno (19-30 AU), laddove la temperatura della nebulosa solare era tale da permettere la condensazione del materiale volatile. A causa delle perturbazioni gravitazionali dei pianeti giganti in rapida formazione, le comete, similmente agli asteroidi, non riuscirono ad unirsi a formare un pianeta. Una volta dissipato il gas dal disco proto-planetario, le interazioni dei pianeti giganti con la cintura di planetesimi ghiacciati disposta tra 20 AU e 35 AU, hanno successivamente modificato le caratteristiche orbitali di tali planetesimi, portando ad una redistribuzione delle comete nel Sistema Solare. Alcune furono immesse nella regione più interna del Sistema Solare, dove risiedono i pianeti rocciosi, portando al Late Heavy Bombardment, altre videro un allargamento delle proprie orbite e furono spinte nella fascia di Kuiper, oltre le 30 AU, o a distanze ancora maggiori, nella nube di Oort, tra  $10^4$  e  $10^5$  AU. Un'analisi delle orbite delle comete ha subito rivelato, oltre alla loro elevata eccentricità orbitale, indicativa di traiettorie fortemente ellittiche, la possibilità di classificare questi oggetti in base al periodo orbitale. In questo modo, si è potuto distinguere tra comete *a lungo periodo*, con orbite che superano i 200 anni, e

comete *a corto periodo*, con un periodo orbitale inferiore a 200 anni. La maggior parte delle comete conosciute appartiene al gruppo delle comete a lungo periodo, che rappresentano circa l'84% del totale. Queste comete attraversano la zona planetaria del Sistema Solare con inclinazioni casuali rispetto all'eclittica e la maggior parte di esse segue un'orbita retrograda.

Le comete a corto periodo presentano orbite caratterizzate da basse inclinazioni sul piano dell'eclittica e, per tale ragione, è stata postulata, nel 1943 da Edgeworth e nel 1951 da Kuiper, la presenza di una cintura di planetesimi ghiacciati oltre l'orbita di Nettuno, la Kuiper Belt, che sarebbe dunque il luogo di provenienza di queste comete (Edgeworth, 1943; Kuiper, 1951). Le comete a corto periodo possono essere successivamente suddivise in due gruppi dinamici: le comete *della famiglia di Giove* (JFC), con periodi inferiori a 20 anni, e le comete *di tipo Halley* (HTC), con periodi orbitali compresi tra 20 e 200 anni. Le comete della famiglia di Giove hanno periodi orbitali tipici di circa 5-6 anni, seguono orbite prograde con eccentricità di circa 0.5 e presentano afeli prossimi all'orbita del pianeta gigante. Le comete di tipo Halley mostrano un intervallo di inclinazioni orbitali già più ampio rispetto alle JFC, con eccentricità maggiori e afeli che cadono nella regione della Kuiper Belt.

Dato che le comete a lungo periodo presentano un'ampia varietà di inclinazioni, nel 1950 fu ipotizzata da Oort la presenza di una regione quasi sferica, posta ai confini del Sistema Solare, tra  $10^4$  e  $10^5$  AU, che costituirebbe dunque il luogo d'origine delle comete a lungo periodo (Oort, 1950). Sulla base del valore del semiasse maggiore dell'orbita cometaria ad una certa epoca, le comete a lungo periodo possono essere classificate come *new comet* se  $a > 10000$  AU e *returning comet* se  $a < 10000$  AU. In seguito a ripetuti passaggi di una cometa al perielio, l'espulsione di materiale dal nucleo durante l'attività cometaria e l'interazione gravitazionale con i pianeti giganti portano ad una diminuzione del semiasse maggiore, restringendo l'orbita cometaria. Per tale motivo, molte *returning comet* erano un tempo *new comet*, che hanno subito nel tempo una riduzione del semiasse maggiore.

Una classificazione dinamica più moderna delle comete utilizza invece l'invariante di Tisserand, che consente di riconoscere una cometa periodica in maniera praticamente univoca nei passaggi successivi al primo. L'invariante di Tisserand rispetto a Giove è definito dalla formula:

$$T = \frac{a_J}{a} + 2 \sqrt{\frac{a(1 - e^2)}{a_J}} \cos i \quad (1.3)$$

ove  $a_J$  è il semiasse maggiore dell'orbita di Giove, mentre  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita cometaria,  $e$  la sua eccentricità e  $i$  la sua inclinazione.

A causa delle perturbazioni esercitate dai pianeti, soprattutto Giove, e della diminuzione della massa del nucleo cometario per espulsione del materiale a seguito dell'attività cometaria, una cometa si ripresenta al perielio con i parametri orbitali mutati, rendendo più difficile l'identificazione della cometa. L'invariante di Tisserand fornisce quindi un metodo per verificare se oggetti osservati in due successive apparizioni siano o no la stessa cometa.

La nuova classificazione basata sull'invariante di Tisserand prevede che le comete con  $T_J > 2$  siano definite *eclittiche*, poiché presentano basse inclinazioni sul piano dell'orbita terrestre, mentre le comete con  $T_J < 2$  siano denominate *quasi isotropiche*, a causa dell'ampio intervallo di inclinazioni con cui si presentano. Le comete eclittiche sono ulteriormente divise in tre classi: quelle con  $2 < T_J < 3$  sono *le comete della famiglia di Giove*, in quanto dinamicamente dominate dal pianeta; quelle con  $T_J > 3$  sono chiamate *di tipo Encke* se  $a < a_J$ , ovvero l'orbita è interna a quella di Giove, e *di tipo Chirone* se  $a > a_J$ , ovvero l'orbita della cometa è esterna a quella di Giove. È possibile l'evoluzione dinamica di una cometa attraverso il valore  $T_J = 3$ , da un'orbita di tipo Chirone a orbita di tipo JFC. A causa della presenza delle forze "non gravitazionali", che diventano più importanti a piccole distanze eliocentriche, non è immediato il passaggio successivo in orbite di tipo Encke. Siccome le comete di tipo Chirone sono fornite dalla regione transnettuniana, si ipotizza che, analogamente alle comete a corto periodo, le comete eclittiche originino tutte dalla fascia di Kuiper.

Anche gli oggetti quasi isotropici sono suddivisi in due gruppi: le *new comet*, aventi il semiasse maggiore  $a > 10000$  AU, e le *returning comet*, con  $a < 10000$  AU. Le *returning comet* si dividono in *external*, con  $a > 40$  AU e *di tipo Halley*, con  $a < 40$  AU. Anche le orbite di tali comete possono cambiare sottoclasse a seguito di successivi passaggi al perielio. Come con le comete a lungo periodo, si ipotizza che le comete quasi isotropiche derivino dalla nube di Oort.

### 1.3 ORBITE COMETARIE ED EVOLUZIONE TERMICA DEL NUCLEO

Fintanto che una cometa si trova ancora nella nube di Oort, a grandi distanze eliocentriche, questa non risente del calore trasportato dall'irraggiamento solare e dell'azione dei pianeti giganti. Stelle di passaggio, perturbazioni galattiche e dense nubi stellari possono invece modificare l'orbita delle comete risidenti in tale regione periferica del Sistema Solare e immetterle nel Sistema Solare interno. A seguito dell'irraggiamento dovuto ai raggi cosmici galattici, le comete nella nube di Oort sviluppano un mantello termicamente isolante, detto 'mantello di irradiazione'. I legami molecolari dei ghiacci vengono indeboliti, con il rilascio di idrogeno, formando diversi composti organici che contribuiscono alla formazione di un mantello molto scuro, di diversi metri in profondità e in grado di sopravvivere a molteplici passaggi al perielio

(Strazzulla et al., 1991, Johnson et al., 1987). Ciò spiega i bassi valori di albedo trovati per molte comete classiche. Questo processo continua finché non si raggiunge la saturazione, che avviene in circa 100 milioni di anni (Jewitt, 1992).

Nell'avvicinamento al perielio, le comete vanno a interagire con i pianeti giganti, soprattutto Giove, e sono inoltre soggette alle forze di reazione "non gravitazionali" indotte dall'attività cometaria. Dato che i nuclei delle comete sono in rotazione attorno ad un proprio asse, vi è un ritardo tra l'assorbimento della radiazione solare su un lato della cometa e la successiva espulsione dei gas sublimati, sempre dalla stessa porzione di superficie. Ciò fa sì che tale getto di materiale spinga la cometa non solo in direzione radiale, ma anche tangenzialmente all'orbita stessa. Tale fenomeno è denominato 'effetto razzo'. Se la rotazione del nucleo è concorde con il moto di rivoluzione, allora la cometa vedrà un allargamento della propria orbita, con un aumento del semiasse maggiore e del periodo orbitale, portando, rispetto al caso in cui tale effetto non sia presente, ad un ritardo nel passaggio successivo al perielio. Viceversa, una cometa il cui nucleo ha rotazione retrograda, presenterà invece un anticipo al successivo passaggio al perielio. Queste forze sono sempre presenti se una cometa è attiva e possono anche variare molto in intensità durante lo stesso transito nella regione interna del Sistema Solare, dato che l'espulsione del materiale cometario non avviene in maniera sempre costante. Si ha dunque una certa incertezza nella predizione dell'orbita di una cometa attiva. Nell'entrata di una cometa nel Sistema Solare interno, la pressione esercitata sulla superficie a opera dei gas sublimati negli strati sottostanti, per effetto del calore solare, porterà a fratture nel mantello di irradiazione, laddove lo spessore è minore. Con la fuga dei gas dal nucleo, le particelle di materiale refrattario più grandi non vengono trascinate via e, ricadendo sulla superficie, creano un accumulo nelle zone meno attive, formando uno schermo isolante, un mantello roccioso di spessore variabile, che protegge i ghiacci sottostanti dalla radiazione incidente (Jewitt, 1992). L'indebolimento dell'attività cometaria che si osserva nelle comete molto periodiche, che hanno eseguito numerosi passaggi al perielio, può essere giustificato dalla formazione di tale strato roccioso, che porta infine allo spegnimento definitivo della cometa (Elidoro, 1996). Lo spessore di questa crosta dipende da fattori come l'efficienza della sublimazione e l'età della cometa. Se lo spessore diventa maggiore della capacità di penetrazione termica, l'efficienza della sublimazione diminuisce e la regione diventa inattiva. Per questo motivo si descrivono le comete nuove o giovani, ovvero osservate ai loro primi passaggi nella regione interna del Sistema Solare, come oggetti primitivi, che hanno subito pochi o nessun cambiamento durante la loro lunga permanenza nelle regioni più esterne del Sistema Solare, e costituiscono dunque una preziosa fonte di materiale della nebulosa solare originaria.

La vita dinamica di una cometa dura circa  $10^5$  anni e termina solitamente con uno, o più, dei seguenti scenari:

- esaurimento del materiale volatile o impossibilità per i gas di fuoriuscire dal nucleo, assumendo dunque un aspetto asteroidale;
- frammentazione del nucleo in più oggetti di dimensioni minori o la sua completa polverizzazione;
- espulsione dal Sistema Solare;
- impatto su altri corpi celesti come pianeti, satelliti o il Sole;

Un esempio è la cometa Shoemaker-Levy 9 che nel luglio del 1992 superò il limite di Roche di Giove, attorno al quale era in orbita, e venne frammentata in più parti dalle forze mareali. Nel luglio del 1994, ventuno frammenti della cometa sono precipitati sul pianeta gigante, costituendo il primo evento osservato della collisione tra una cometa e un altro corpo del Sistema Solare.

#### 1.4 SPETTRI COMETARI NELL'OTTICO

Lo spettro ottico di una cometa è costituito da due tipi di emissione: un'emissione continua, detta "il continuo", ed emissioni discrete, ovvero righe e bande dovute sia ad atomi o molecole neutre che a ioni atomici o molecolari. Il continuo è dovuto alla diffusione della radiazione solare da parte della polvere che si trova nella chioma e nella coda di tipo II. La distribuzione d'intensità del continuo è uguale a quella della radiazione solare, anche se leggermente più arrossata, e appare negli spettri bidimensionali longslit come un'emissione stretta lungo la direzione della dispersione, al centro dello spettro cometario. Sulla cometa, la larghezza dell'emissione continua corrisponde a un diametro che varia da qualche migliaio a qualche decina di migliaia di chilometri e che poi si estende nella direzione della coda di polveri. 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. Negli spettri bidimensionali a fenditura lunga, le emissioni neutre, provenienti dalla chioma, si ripartiscono quasi simmetricamente rispetto al continuo. Alcune, come le bande del  $\text{NH}_2$ ,  $\text{CH}$  e  $\text{C}_3$ , sono corte, mentre altre, come la banda del  $\text{CN}$  a  $3880 \text{ \AA}$ , sono molto estese e raggiungono numerosi chilometri sulla cometa. In Figura 1.1 è mostrato, come esempio, uno spettrogramma della chioma della cometa Kobayashi-Berger-Milon tra  $3000 \text{ \AA}$  e  $6500 \text{ \AA}$ , ottenuto da S. Wyckoff e P.A. Wehinger il 7 agosto 1975 con il telescopio 1-m dell'Osservatorio di Wise, dove si può osservare l'emissione continua centrale e le bande molecolari dei radicali neutri che si distribuiscono simmetricamente al continuo coprendo una certa porzione della lunghezza della fenditura (Wyckoff, 1981).

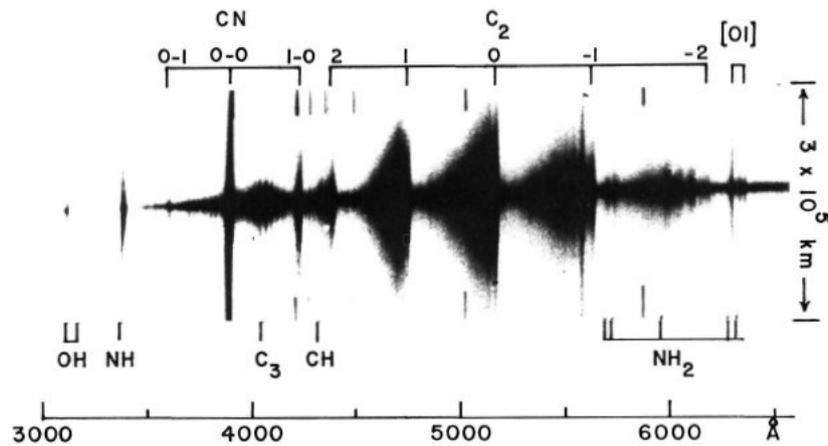


Figura 1.1: Spetrogramma della cometa Kobayashi-Berger-Milon tra 3000 e 6500 Å, ottenuto il 7 agosto 1975 ( $r = 0.8$  AU,  $\Delta = 0.6$  AU) da S. Wyckoff e P.A. Wehinger con il telescopio 1-m dell'Osservatorio di Wise. Fonte: [19].

La coda di ioni si forma solitamente a  $r \leq 2$  AU, e il suo spettro mostra la presenza di ioni come  $\text{CO}^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CH}^+$  e  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Le emissioni della coda di tipo I sono nettamente asimmetriche e allungate nella direzione antisolare a causa dell'interazione con il vento solare, che tende ad allontanarli dalla chioma per formare la coda di tipo I. In Figura 1.2 è mostrato, come esempio, uno spettrogramma della cometa Kohoutek tra 5100 Å e 7900 Å, acquisito da P.A. Wehinger e S. Wyckoff l'11 gennaio 1974 all'Osservatorio di Wise, ottenuto posizionando la fenditura sulla chioma e allineandola con la direzione della coda di ioni. Si può osservare la distribuzione asimmetrica delle emissioni dello ione  $\text{H}_2\text{O}^+$  rispetto al continuo, a differenza delle emissioni dei radicali neutri della chioma come il  $\text{C}_2$  o il  $\text{NH}_2$  (Wehinger et al., 1973f). Generalmente, la chioma neutra di una cometa si forma a  $r \leq 3$  AU, quando la maggior parte dei gas ha iniziato a sublimare. A maggiori distanze eliocentriche, solitamente oltre le 8 AU, ma anche già dopo 5-6 AU, lo spettro è essenzialmente costituito dal continuo diffuso dalla polvere della chioma o dal nucleo della cometa. Nell'avvicinamento della cometa al Sole, appaiono in sequenza, negli spettri, righe e bande di emissione delle varie specie atomiche e molecolari. Nella regione spettrale dell'ottico, tra 3000 Å e 8000 Å, la prima banda a comparire, a circa 3 AU, è la banda  $\Delta v=0$  del CN attorno a 3880 Å. Questa è la più intensa in tale regione spettrale e definisce l'estensione della chioma neutra. Il radicale CN produce nella regione ottica altre bande: la banda  $\Delta v=+1$  a circa 3590 Å, estremamente debole, delle bande nel vicino infrarosso attorno a 7900 Å e la banda  $\Delta v=-1$  attorno a 4200 Å; visibili in Figura 1.1 e in Figura 1.2.

A  $2 < r < 3$  AU appaiono le emissioni del  $\text{C}_3$  a circa 4050 Å e varie bande del  $\text{NH}_2$  distribuite lungo lo spettro. Si possono trovare bande del  $\text{NH}_2$  attorno alle lunghezze d'onda di 5700 Å, 5976 Å, 6335 Å, 6618 Å, 6967 Å e 7350 Å, visibili in Figura 1.2.



stratosfera. A  $r < 1$  AU, si presentano anche le righe dell'[OI] a  $\lambda=6300, 6364 \text{ \AA}$  e il doppietto del sodio a  $5890, 5896 \text{ \AA}$ . Queste righe sono molto complesse da separare dalle righe del cielo a cui sono praticamente sovrapposte.

Esiste una classe di comete, denominate '*sun-grazing*', o comete 'radenti', che passano estremamente vicine al Sole al perielio ( $\ll 1$  AU). Negli spettri di tali comete si osservano anche righe di emissione di metalli come Cr, Mn, Fe, Co, Ni e Cu, e di elementi come H, C, N e S, a causa delle piccole distanze eliocentriche raggiunte ( $r < 0.02$  AU). Il calore solare è sufficientemente intenso, a tali distanze, da far sublimare la componente refrattaria della polvere e compaiono dunque elementi che altrimenti sarebbero rimasti racchiusi nei grani sottoforma di silicati.

Man mano che la cometa si avvicina al Sole, le emissioni aumentano di intensità fino ad arrivare a un picco, oltre il quale, per distanze maggiori, si ha una diminuzione dell'intensità, poiché i meccanismi di distruzione ad opera dei fotoni solari diventano dominanti sulla sublimazione dei ghiacci. Dalle osservazioni spettrofotometriche nel visibile è possibile calcolare il rapporto riga/continuo, ovvero il rapporto tra le emissioni dei gas e della polvere, permettendo di studiare la natura del nucleo della cometa in esame e di confrontare tale valore con quello di altre comete. Comete diverse presentano rapporti riga/continuo diversi e ciò indica che vi siano comete più polverose di altre.

## CAPITOLO 2

### 2.1 STRUMENTAZIONE E DATASET

Gli spettri delle comete analizzati in questa tesi sono stati raccolti nell'ambito del progetto *Atlante delle Comete di Asiago*<sup>1</sup>, che raccoglie in tutto 10 anni di osservazioni spettroscopiche di comete con il telescopio 122 cm Galileo dell'Osservatorio Astrofisico di Asiago.

Lo specchio primario del telescopio<sup>2</sup> Galileo, di forma parabolica, ha un diametro di 122 cm con foro centrale di 19.5 cm e una lunghezza focale di 600 cm, mentre lo specchio secondario, di forma iperbolica, ha un diametro di 52 cm e una lunghezza focale di 456 cm. In configurazione Cassegrain, la lunghezza focale equivalente del telescopio raggiunge i 1200 cm con una scala di 17.2"/mm. La fenditura dello spettrografo, lunga 28 cm, ha un'apertura variabile fino a oltre 1 mm e serve a selezionare le sorgenti delle quali si vuole ottenere lo spettro, oltre che a contribuire a determinare il potere risolutivo dello strumento. Uno specchio parabolico fuori asse, di 90 cm di diametro e lunghezza focale di 81 cm, serve a collimare il fascio verso il reticolo. Si hanno a disposizione quattro reticoli con densità di tratti e angoli di blaze differenti, con dispersione fino a 0.6 Å/px. In Tabella 2.1 sono stati riportati i vari reticoli<sup>3</sup> disponibili con le loro caratteristiche. La luce dispersa viene diretta verso la Dioptric Blue Galileo Camera con lunghezza focale di 188 mm e combinata con la CCD Andor iDus DU440, dotata del sensore E2V 42-10 Back Illuminated da 2048x512 pixel, ognuno con dimensione di 13.5x13.5 micron, in grado di coprire un'area in mm di 27.6x6.9. IL CCD ha un gain di 1.4 e<sup>-</sup>/ADU e un Readout Noise di 3 e<sup>-</sup>. La scala spaziale del CCD è pari a 1"/px. Sono anche installate diverse lampade per la calibrazione in lunghezza d'onda. In questo caso è stata utilizzata la lampada He-Fe-Ar.

Gli spettri delle chiome delle comete 32P/Comas Solà, 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2, assieme alle immagini di flat-field, agli spettri della lampada di calibrazione HeFeAr, alle pose dell'analogo solare 16 Cygni B e della stella standard spettrofotometrica HR7596, sono stati acquisiti la notte tra il 12 e il 13 novembre 2023 all'Osservatorio di Asiago a partire dalle 15:59 UT. I dati di tutte le immagini sono riportati in tabella 2.2. Per tutti gli spettri è stato scelto il reticolo da 300 tr/mm, che ha una dispersione di 2.25 Å/px (Tabella 2.1) e permette di ottenere spettri tra 3200 e 7900 Å.

---

<sup>1</sup> atlantecomete@gmail.com

<sup>2</sup> I dati tecnici del telescopio Galileo e dello spettrografo sono stati presi dal sito web del Dipartimento di Astronomia: <http://www.astro.unipd.it/osservatorio/telescopio.html>

<sup>3</sup> I dati tecnici del CCD e dei reticoli sono stati presi dal sito web del Dipartimento di Fisica e Astronomia alla sezione 'Osservare': <https://www.dfa.unipd.it/dipartimento/sedi-e-strutture/sede-di-asiago/osservare/>

Reticolo	Angolo di blaze	$\lambda$ di blaze	Dispersione	Dispersione
(tr/mm)	( $^{\circ}$ , $'$ )	( $\text{\AA}$ )	( $\text{\AA}/\text{mm}$ )	( $\text{\AA}/\text{px}$ )
150	2 09	5000	328.5	4.43
300	4 18	5000	166.8	2.25
600	8 38	4500	85.2	1.15
1200	26 45	6825	44.3	0.6

**Tabella 2.1:** Elenco dei reticoli disponibili e delle loro caratteristiche.

I dati di tutte le immagini sono riportati in tabella 2.2. Per tutti gli spettri è stato scelto il reticolo da 300 tr/mm, che ha una dispersione di 2.25  $\text{\AA}/\text{px}$  (Tabella 2.1) e permette di ottenere spettri tra 3200 e 7900  $\text{\AA}$ . La slit è stata posta a 300  $\mu\text{m}$  per tutte le esposizioni, tranne che per gli spettri della lampada HeFeAr, che hanno la slit larga 150  $\mu\text{m}$ . Non è stata raccolta alcuna immagine di dark, essendo stato utilizzato un CCD professionale che, mantenuto a basse temperature, minimizza l'effetto della corrente di buio.

Nome	Image Type	Apertura della fenditura	Tempo di esposizione
		( $\mu\text{m}$ )	(s)
IMA114170	BIAS	200	0.0
IMA114171	BIAS	200	0.0
IMA114172	BIAS	200	0.0
IMA114173	BIAS	200	0.0
IMA114174	BIAS	200	0.0
IMA115779	FLAT	300	0.4
IMA115780	FLAT	300	0.4
IMA115781	FLAT	300	0.4
IMA115782	FLAT	300	0.4
IMA115783	FLAT	300	0.4
IMA115784	FLAT	300	0.4
IMA115785	FLAT	300	0.4
IMA115786	HR7596	300	11.0
IMA115787	HR7596	300	11.0
IMA115788	HR7596	300	11.0
IMA115789	HR7596	300	11.0
IMA115790	HR7596	300	11.0
IMA115791	HeFeAr	150	15.0
IMA115795	16Cymb	300	30.0
IMA115796	16Cymb	300	30.0
IMA115797	16Cymb	300	30.0
IMA115801	FLAT	300	0.4

IMA115802	FLAT	300	0.4
IMA115803	FLAT	300	0.4
IMA115804	FLAT	300	0.4
IMA115805	FLAT	300	0.4
IMA115806	FLAT	300	0.4
IMA115807	FLAT	300	0.4
IMA115808	FLAT	300	0.4
IMA115809	HeFeAr	150	15.0
IMA115824	C/2023 H2	300	300.0
IMA115828	HeFeAr	150	15.0
IMA115829	HeFeAr	150	15.0
IMA115831	12P	300	600.0
IMA115832	FLAT	300	0.5
IMA115833	FLAT	300	0.5
IMA115834	FLAT	300	0.5
IMA115835	FLAT	300	0.5
IMA115836	FLAT	300	0.5
IMA115837	HeFeAr	150	15.0
IMA115838	HeFeAr	150	15.0
IMA115840	32P	300	600.0

**Tabella 2.2: Dati delle immagini FITS, in ordine di acquisizione, utilizzate nella riduzione dati.**

Nella tabella 2.3 sono riportati i parametri orbitali delle tre comete<sup>4</sup>, quali il periodo orbitale, il semiasse maggiore  $a$ , il perielio  $p$ , l'eccentricità  $e$ , l'inclinazione  $i$  e l'epoca a cui tali valori sono riferiti.

A partire da tali valori, ho personalmente stimato il parametro di Tisserand  $T_J$ , riportato in Tabella 2.4, per tutte e tre le comete in modo da poterle classificare su tale base. Nel calcolo è stato utilizzato per il semiasse maggiore dell'orbita di Giove il valore di  $a_J = 5.2$  AU.

Nome	Epoca	Periodo orbitale (anni)	Semiasse maggiore (AU)	Perielio (AU)	Eccentricità	Inclinazione (°)
12P	2023 Sep-20.0	71.24	17.18	0.78	0.954	74.19
32P	2019 Sep-30.0	9.54	4.5	2	0.556	9.95
C/2023	2023 Oct-07.0	3730.93	240.55	0.89	0.996	113.75

**Tabella 2.3: Parametri orbitali delle comete 12P, 32P e C/2023 H2.**

<sup>4</sup> I parametri orbitali delle comete sono stati ottenuti dallo Small Database Lookup disposto dal Solar System Dynamics Group del Jet Propulsion Laboratory: [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/)

In Tabella 2.4 sono riportati i dati osservativi principali delle tre comete la notte d'osservazione<sup>5</sup>, quali la distanza eliocentrica  $r$ , la distanza geocentrica  $\Delta$  e la magnitudine totale apparente nella banda visuale.

Nome	Distanza eliocentrica (AU)	Distanza geocentrica $\Delta$ (AU)	Magnitudine totale apparente visuale	Parametro di Tisserand
12P/Pons- Brooks	2.62	2.79	13.5	0.6
32P/Comas Solà	2.45	1.47	15.8	2.68
C/2023 H2	0.93	0.2	12.4	-0.47

**Tabella 2.4: Dati osservativi delle comete 12P, 32P e C/2023. È anche riportato il valore del parametro di Tisserand che ho calcolato personalmente.**

### 12P/Pons-Brooks

La cometa 12P/Pons-Brooks è una cometa periodica con periodo orbitale di 71.2 anni, scoperta ufficialmente il 21 luglio 1812 dall'astronomo Jean-Louis Pons. Con un parametro di Tisserand di circa 0.6 e un semiasse maggiore inferiore a 40 AU, la 12P/Pons-Brooks è classificata come cometa a corto periodo di tipo Halley (HTC). All'epoca dell'osservazione, la cometa si trovava ad una distanza eliocentrica di 2.62 AU e geocentrica  $\Delta = 2.79$  AU e presentava una magnitudine totale apparente nel visuale di 13.5.

### 32P/Comas Solà

La cometa 32P/Comas Solà è una cometa periodica con periodo orbitale di 9.5 anni, scoperta ufficialmente dall'astronomo catalano Josep Comas i Solà il 6 novembre 1926. È una cometa a corto periodo con parametro di Tisserand  $T_J \approx 2.68$  e quindi appartenente al gruppo dinamico delle comete della famiglia di Giove (JFC). Si trovava, all'epoca di osservazione, ad una distanza eliocentrica  $r = 2.45$  AU e geocentrica di 1.47 AU e presentava una magnitudine totale apparente nel visuale di 15.8.

### C/2023 H2 (Lemmon)

La cometa C/2023 H2 (Lemmon) è una cometa con periodo orbitale di 3730.9 anni. È una cometa a lungo periodo con parametro di Tisserand  $T_J \approx -0.47$  e semiasse maggiore

<sup>5</sup> I dati osservativi delle comete sono stati presi dal servizio di calcolo Horizons disposto dal Solar System Dynamics Group del Jet Propulsion Laboratory: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>

compreso tra 40 e 1000 AU. È dunque classificata come cometa *returning* di tipo *external*. Avendo un'inclinazione orbitale maggiore di  $90^\circ$ , la sua orbita è retrograda. La cometa si trovava all'epoca di osservazione a una distanza eliocentrica  $r = 0.93$  AU e geocentrica  $\Delta = 0.2$  AU, presentando una magnitudine totale apparente nel visuale di 12.4.

### **Analogo solare 16 Cygni B (HR7504)**

La stella 16 Cygni B (HR7504), con ascensione retta di  $19^{\text{h}}41^{\text{m}}51.97^{\text{s}}$  e declinazione di  $+50^\circ31'03.1''$  (J2000), è una stella di classe spettrale G3V con magnitudine in banda V di 6.2. I dati sono stati presi dal SIMBAD Astronomical Database<sup>6</sup>.

### **Stella standard spettrofotometrica HR7596**

Come stella standard spettrofotometrica per la calibrazione in flusso degli spettri cometari, è stata scelta la stella HR7596 (58 Aquilae) di classe spettrale A0III, magnitudine in banda H di  $5.233 \pm 0.023$  e coordinate equatoriali  $19^{\text{h}}54^{\text{m}}44.79^{\text{s}}$ ,  $+00^\circ16'24.82''$  (J2000). I dati sono stati presi dal NASA/IPAC Extragalactic Database<sup>7</sup>.

## **2.2 ELABORAZIONE DATI CON IRAF**

Come meglio spiegato nella Sezione 1.4, lo spettro ottico della chioma di una cometa è costituito da due contributi: lo spettro solare riflesso dalle polveri e le bande e righe di emissione del gas. All'acquisizione di uno spettro o un'immagine, il passaggio della radiazione proveniente dalla sorgente attraverso la strumentazione influenza il segnale aggiungendo del rumore, ovvero un contributo al valore di intensità dell'immagine non dovuto alla sorgente ma ad effetti strumentali. È perciò necessario operare sull'immagine grezza, una serie di passaggi che permettano di correggere per diversi effetti come il livello zero del CCD, la diversa sensibilità dei pixel, la presenza di raggi cosmici e l'emissione del cielo, oltre a calibrare gli spettri in unità fisiche di lunghezza d'onda e flusso, permettendo di eseguire misure fisiche sulle immagini. Verrà anche sottratto il contributo continuo dagli spettri cometari in modo da isolare le emissioni del gas, che verranno poi analizzate nel Capitolo 3. Per tale passaggio della riduzione, ho seguito due metodi diversi sulla base dello spettro considerato. Al termine della riduzione, si ottiene un'immagine bidimensionale in cui il valore d'intensità di ogni pixel è legato il più possibile al flusso emesso dalla sorgente anziché a effetti dovuti alla strumentazione o al cielo. Non è stata effettuata alcuna correzione per la corrente di

---

<sup>6</sup> <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?ident=m33&submit=SIMBAD+search>

<sup>7</sup> <https://ned.ipac.caltech.edu/>

buio poiché trascurabile, dato che il CCD utilizzato è mantenuto a temperature molto basse.

Negli spettri, la dispersione in lunghezza d'onda è diretta lungo l'asse orizzontale (asse  $x$ ), mentre l'asse verticale (asse  $y$ ) dà la posizione lungo la fenditura. Come primo passaggio, sono state sommate, con il comando *imcombine*, le tre pose dell'analogo solare, così da ottenere un unico frame. Con lo stesso comando sono stati sommati anche i cinque spettri bidimensionali della stella standard spettrofotometrica HR7596. Questi però non erano perfettamente allineati in  $y$  ed è stato quindi prima utilizzato il comando *imshift* su quattro delle pose in modo da allinearle, tenendo la prima immagine come riferimento. Di seguito sono mostrati gli spettri bidimensionali non ridotti delle chiome delle comete 12P/Pons-Brooks, 32P/Comas Solà e C/2023 H2. Si può osservare che negli spettri delle comete 12P/Pons-Brooks e 32P/Comas Solà è anche presente un altro oggetto in fenditura. Entrambi presentano uno spettro di tipo stellare.

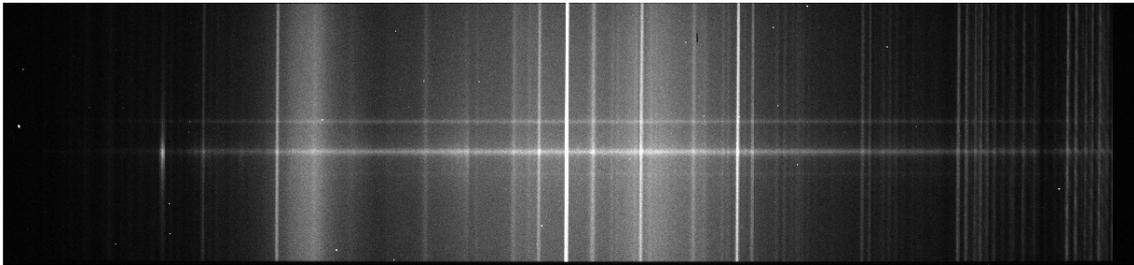


Figura 2.1: Spettro bidimensionale longslit, non ancora ridotto, della cometa 12P/Pons-Brooks.

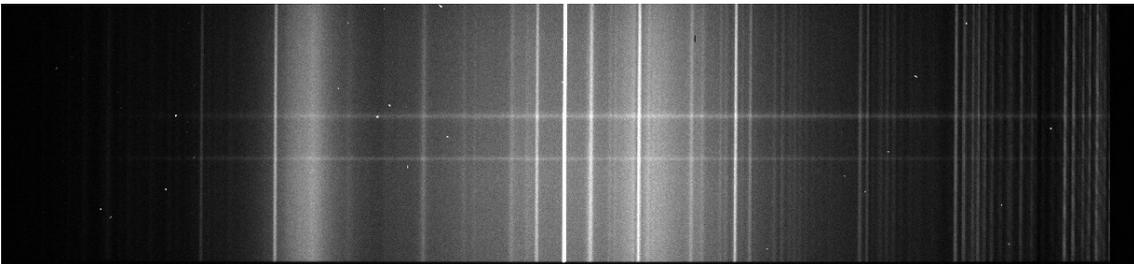


Figura 2.2: Spettro bidimensionale longslit, non ancora ridotto, della cometa 32P/Comas Solà.

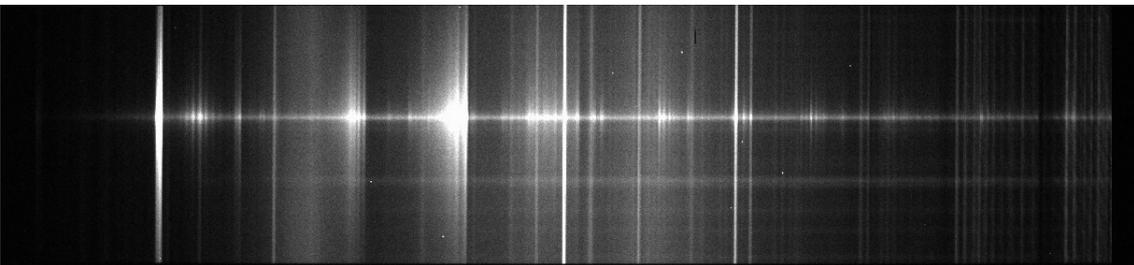


Figura 2.3: Spettro bidimensionale longslit, non ancora ridotto, della cometa C/2023 H2.

## 2.2.1 PARTE INIZIALE DELLA RIDUZIONE DEGLI SPETTRI DELLE COMETE 12P, 32P E C/2023 H2

### Correzione per bias e flat-field

Un'immagine di bias è un'immagine presa al CCD con l'otturatore chiuso e per un tempo di posa pari a zero secondi, permettendo dunque di stimare il livello zero e l'errore di lettura del CCD. Anche se in questo modo vengono raccolti zero fotoelettroni, facendo un istogramma di un'immagine di bias, si ottiene comunque una distribuzione gaussiana dei valori in ADU dell'intensità dei pixel centrata attorno allo zero, con una larghezza  $\sigma$  legata al gain e al Readout Noise del CCD. Ciò avviene perché l'operazione di lettura della carica contenuta in ogni pixel, in seguito convertita in ADU (conteggi di fotoni), per opera dell'elettronica del CCD, è affetta da errore e aggiunge quindi del rumore all'immagine. Il CCD, per evitare di lavorare con numeri negativi, aggiunge automaticamente ai conteggi di ogni pixel un valore positivo, così che la statistica del bias sia centrata attorno ad un valore medio non nullo. Poiché tale livello zero è una quantità che viene aggiunta ad ogni esposizione, è necessario sottrarlo dalle immagini.

Avendo il CCD un gain di circa  $1 e^-/ADU$ , facendo una statistica di un'immagine di bias con il comando *imstat*, si ottiene una stima diretta del Readout Noise del CCD dalla deviazione standard (stddev). Le cinque immagini di bias sono state mediate attraverso il comando *zerocombine*, una volta entrati nei package *noao.imred.ccdred*, in modo da ottenere un'unica immagine di bias, il bias medio, ogni pixel del quale è dato dalla media dei valori di intensità del pixel nelle cinque immagini combinate (Figura 2.4). In Tabella 2.5 è riportata la statistica (valor medio, deviazione standard, massimo e minimo valore dei conteggi) delle cinque immagini di bias e del bias medio. Si osserva che il valore medio è rimasto pressoché lo stesso mentre la deviazione standard è diminuita di un fattore  $\sqrt{5}$ . Questo perché nel combinare  $n$  immagini di bias con  $stddev=\sigma$ , assumendo plausibilmente che tutti i bias abbiano pressappoco lo stesso  $\sigma$  e lo stesso valor medio, si ottiene un'immagine con lo stesso valor medio ma un  $\sigma$  ridotto di un fattore  $\sqrt{n}$ , poiché, nella media, la somma dei  $\sigma$  dei vari bias è quadratica.

Immagine	Media	Deviazione standard	Minimo	Massimo
IMA114170	285.5	3.709	270.0	307.0
IMA114171	285.6	3.687	270.0	309.0
IMA114172	284.4	3.093	270.0	301.0
IMA114173	283.2	2.79	269.0	297.0
IMA114174	283.2	2.791	270.0	298.0
Bias medio	284.4	1.612	277.0	292.3

Tabella 2.5: Statistica della serie di cinque immagini di bias e del bias medio.

Un'immagine di bias il meno rumorosa possibile permetterà di evitare di aumentare il rumore delle immagini scientifiche nell'operazione successiva di sottrazione del bias.

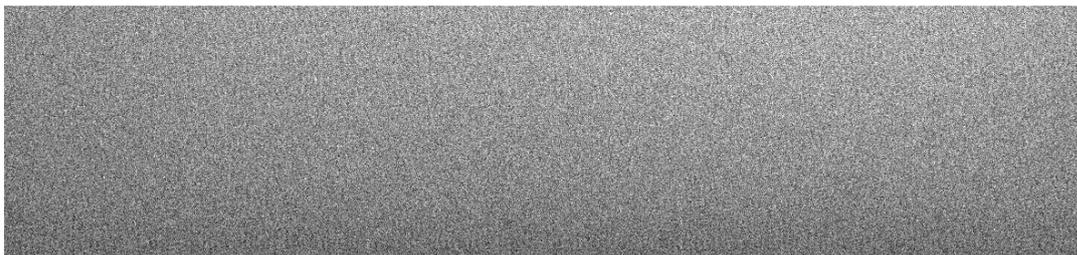


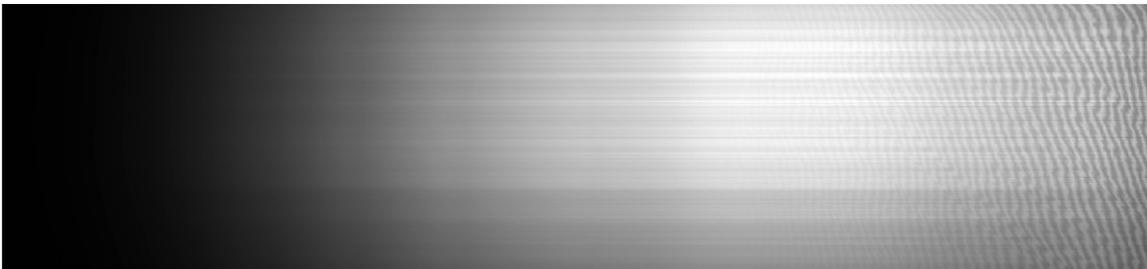
Figura 2.4: Bias medio.

Ogni pixel di un CCD risponde in maniera differente alla radiazione incidente e la correzione per flat-field permette di tener conto di queste disomogeneità, così che nelle immagini scientifiche i conteggi in ogni regione del CCD siano proporzionali alla luce ricevuta anziché alla diversa sensibilità dei pixel. Un'immagine di flat-field si ottiene acquisendo lo spettro di un apposito schermo presente in cupola, illuminandolo con una lampada al quarzo che presenta uno spettro continuo in lunghezza d'onda, ovvero privo di righe di emissione. È un'immagine presa con lo stesso set-up strumentale con cui si effettuano le pose delle comete e della stella di calibrazione, ma con un tempo di esposizione minore. La notte di osservazione sono state raccolte tre serie di immagini di flat-field e ognuna di queste è stata utilizzata per la riduzione di tutti gli spettri ottenuti fino alla serie di flat-field successiva. Ogni serie di flat-field è stata individualmente mediata, corretta per il bias e ritagliata, rimuovendo la regione di overscan. Per compiere tale operazione, è stato utilizzato il comando *flatcombine* dei package *noao.imred.ccdred*, una volta impostato *'process=yes'* nelle impostazioni. Prima di eseguire *flatcombine* sulle serie di flat-field, è però necessario entrare nei parametri del comando *ccdproc* dei package *noao.imred.ccdred*, senza eseguire il comando. Qui è necessario porre *'trim=yes'* e *'zercor=yes'*, inserire in *'trimsec'* la regione in pixel dello spettro senza la regione di overscan e in *'zero'* il nome del file del bias medio. Si sono così ottenute tre immagini di flat-field mediate, ritagliate e corrette per bias. In Figura 2.5 è mostrato, come esempio, il flat-field medio ottenuto per la prima serie di immagini di flat-field (da IMA115779 a IMA115785). Dato che ci interessa correggere le disuniformità percentuali del CCD, ovvero le fluttuazioni attorno al valore 1, il flat-field medio di ogni serie è stato normalizzato dividendo ogni colonna per il suo valor medio di intensità, dato che la dispersione in lunghezza d'onda è diretta lungo l'asse *x* dell'immagine. Per fare ciò sono stati utilizzati tre comandi:

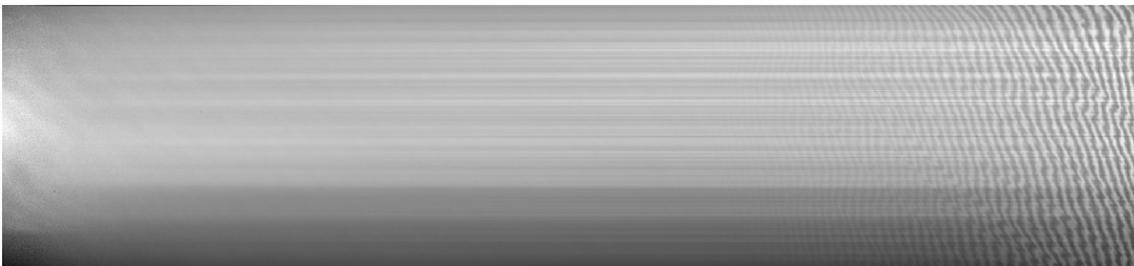
- *blkavg*: questo comando media il file di input a blocchi di pixel rettangolari. È stato mediato tutto il file di flat-field medio lungo l'asse *y*, in modo da ottenere un file monodimensionale lungo 2049 pixel e alto 1 pixel.

- *blkrep*: il file in output del comando *blkavg* viene replicato lungo l'asse y 476 volte, così da ottenere un file bidimensionale di dimensione 2049x476. Ogni colonna di questo file è costante in intensità, che è pari al valor medio dell'intensità dei pixel di tale colonna nel file di flat-field medio.
- *imarith*: si divide infine il flat-field medio per il file bidimensionale in output del comando precedente, ottenendo l'immagine di flat-field medio normalizzato, ovvero con valor medio dei conteggi pari a 1.

Al termine dell'operazione si hanno quindi tre immagini di flat-field medio normalizzate, una per ogni serie di flat-field. Come esempio, è riportato in Figura 2.6 il flat-field medio normalizzato della prima serie di immagini di flat-field.



**Figura 2.5: Flat-field medio della prima serie di immagini di flat-field.**



**Figura 2.6: Flat-field medio normalizzato della prima serie di immagini di flat-field.**

Con il comando *ccdproc* sono stati poi processati gli spettri delle comete, dell'analogo solare, della stella standard spettrofotometrica e della lampada HeFeAr, correggendo per bias, flat-field e rimuovendo la regione di overscan. Si è utilizzato il comando *ccdproc* sulle immagini, ponendo '*trim=yes*', '*zerocor=yes*' e '*flatcor=yes*', inserendo in '*trimsec*' la regione da mantenere, in '*zero*' il file del bias medio e in '*flat*' il rispettivo file di flat-field medio normalizzato. Il comando esegue l'operazione di sottrazione del bias, di divisione per il flat-field medio normalizzato e ritaglia la regione utile dello spettro bidimensionale.

## Rimozione dei raggi cosmici

I raggi cosmici sono particelle ad alta energia, provenienti da eventi come esplosioni di supernova o quasar, ma anche di origine stellare, che incidono sul CCD durante le osservazioni. Per rimuovere i raggi cosmici dalle immagini scientifiche si è utilizzato il programma *lacos\_spec.cl*. Questo programma individua tutte le strutture con una larghezza più piccola di una certa quantità  $r_{min}$ , che è determinata dal seeing, e le sostituisce con il valor medio dei pixel adiacenti, poiché non si possono ottenere strutture con una risoluzione maggiore di quanto il seeing permetta. Queste strutture sono i raggi cosmici che incidono direttamente sul CCD e che sono quasi puntiformi. Inserito il programma nel proprio direttorio, si definisce il nuovo comando con *'task'*. Tra i parametri è necessario inserire il valore del gain e del Readout Noise, Il programma, oltre a fornire un'immagine priva di raggi cosmici, fornisce anche un'immagine "maschera" in cui sono presenti le posizioni dei raggi cosmici sostituiti.

## Calibrazione in lunghezza d'onda

Con la calibrazione in lunghezza d'onda si trasforma il valore in pixel lungo l'asse  $x$  in unità fisiche di lunghezza d'onda (Å), ovvero si trova la soluzione in dispersione (Å/px). È necessario avere a disposizione degli spettri di una lampada con righe di emissione ben note in lunghezza d'onda in modo tale da confrontarle con quelle osservate sul CCD. Sono immagini ottenute prima o dopo le immagini scientifiche e con lo stesso set-up strumentale, ma per un tempo di posa più breve. Generalmente è lo spettro di una lampada tipo Neon, Elio, Argon, Ferro, etc. Della lampada di calibrazione HeFeAr sono state acquisite in totale sei pose. Come primo passo sono state sommate, con il comando *imarith*, le immagini IMA115828 e IMA115829 e le immagini IMA115836 e IMA115837, così da ottenere infine quattro spettri HeFeAr per la calibrazione. Ogni spettro è stato utilizzato per la calibrazione dei frame scientifici successivi in ordine di acquisizione, come gli spettri delle comete e della stella standard spettrofotometrica. L'operazione è stata dunque ripetuta quattro volte fino a calibrare tutti gli spettri. Per la calibrazione di ogni serie di immagini sono stati utilizzati i seguenti comandi in sequenza, una volta entrati nei package *noao.twodspec.longslit*:

- *identify*: si è inserito, nei parametri del comando, il file dello spettro della lampada HeFeAr da utilizzare per la calibrazione, il file *hefear\_list.dat*<sup>8</sup> contenente i valori in lunghezza d'onda di tutte le righe della lampada HeFeAr e si è posto *'section = middle line'*, indicando di iniziare dalla riga centrale. Si è

---

<sup>8</sup> Il file *.dat* contenente la lista delle lunghezze d'onda della lampada HeFeAr e l'atlante delle righe di emissione della lampada, sono stati presi dal sito web del Dipartimento di Fisica e Astronomia alla sezione 'Osservare': <https://www.dfa.unipd.it/dipartimento/sedi-e-strutture/sede-di-asiago/osservare/>

eseguito il programma in modo interattivo. Il programma mostra lo spettro della lampada estratto lungo la riga centrale. Con l'ausilio di un atlante delle righe di emissione, ponendo il cursore su una riga e premendo il tasto 'm', si identificano manualmente alcune righe di emissione inserendo il valore della lunghezza d'onda corrispondente. È sufficiente riconoscere quattro o cinque righe intense. Premendo il tasto 'l', il programma riconosce automaticamente tutte le altre righe. Con 'f' si entra in modalità *fit*, nella quale è possibile definire una funzione interpolante  $\lambda(x)$  che associ una lunghezza d'onda a ciascun pixel della riga centrale dell'immagine.

- *reidentify*: il comando estende automaticamente la soluzione trovata con *identify* per la riga centrale a tutte le altre righe del frame della lampada di confronto.
- *fitcoords*: il comando permette, in maniera interattiva, di controllare e modificare l'interpolazione che dà per ogni valore in pixel  $(x,y)$  un valore in lunghezza d'onda  $(x, \lambda(x))$ . Su ognuno degli assi  $x$  e  $y$  è possibile mostrare la coordinata spaziale in pixel, la lunghezza d'onda fittata o il residuo dell'interpolazione.
- *transform*: si esegue un ricampionamento del frame che determina i nuovi valori dei pixel dell'immagine. Le righe dello spettro della lampada di calibrazione appaiono dritte e perpendicolari all'asse della dispersione, a indicare che l'operazione è avvenuta correttamente. Con lo stesso comando, è stata applicata la calibrazione alle immagini scientifiche successive.

Gli spettri delle comete 12P/Pons-Brook, 32P/Comas Solà e C/2023 H2, calibrati in lunghezza d'onda ed estratti lungo la posizione  $y$  corrispondente al picco di luminosità del continuo, sono riportati rispettivamente in Figura 2.7, 2.8 e 2.9.

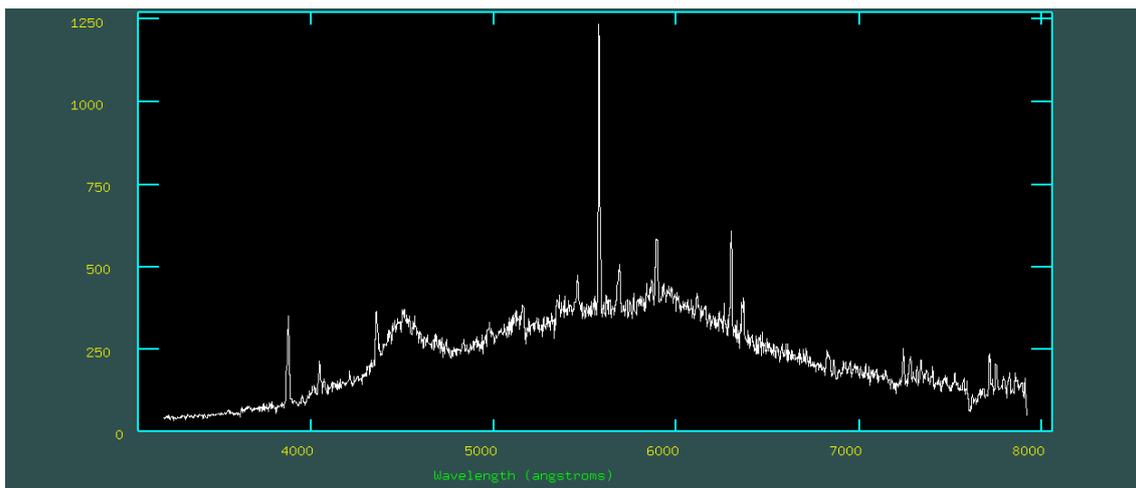


Figura 2.7: Spettro calibrato in lunghezza d'onda della cometa 12P/Pons-Brooks estratto lungo la posizione  $y = 200$ . Lo spettro presenta ancora il contributo del cielo e del continuo.

La banda  $\Delta v=0$  del CN negli spettri delle comete 12P/Pons-Brooks (Figura 2.7) e C/2023 H2 (Figura 2.9), gli unici in cui era ben visibile, si può osservare cadere attorno alla lunghezza d'onda di 3880 Å, come atteso.

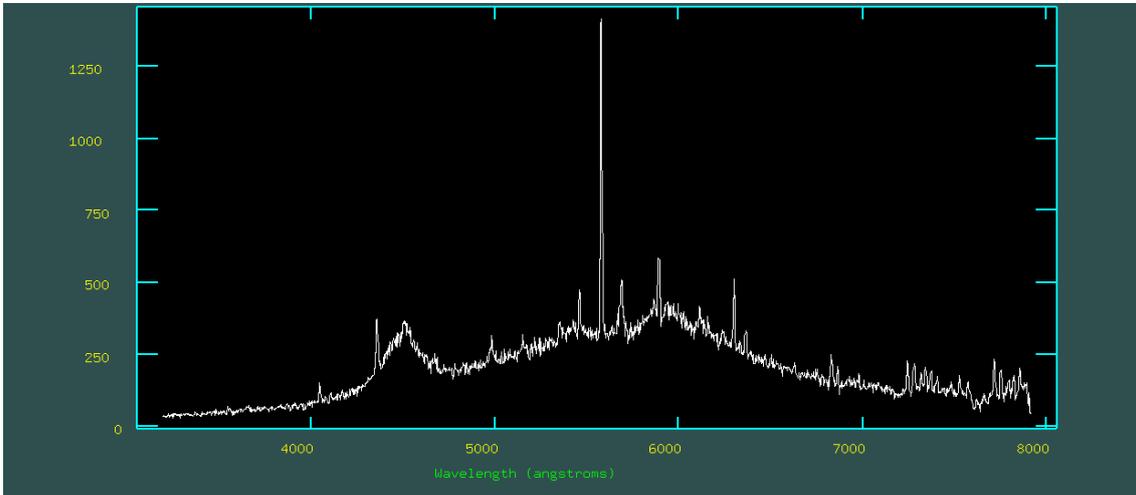


Figura 2.8: Spettro calibrato in lunghezza d'onda della cometa 32P/Comas Solà estratto lungo la posizione  $y = 267$ . Lo spettro presenta ancora il contributo del cielo e del continuo.

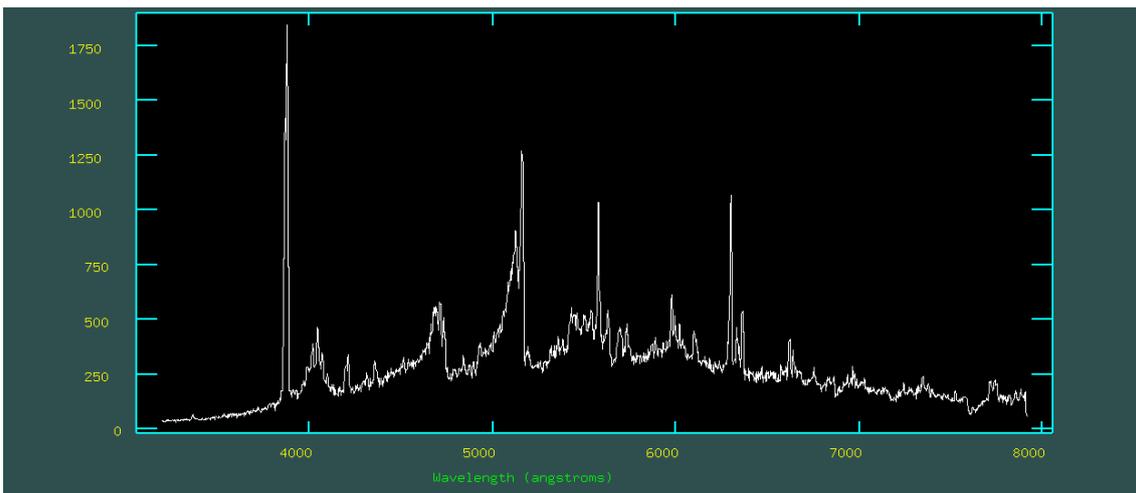


Figura 2.9: Spettro calibrato in lunghezza d'onda della cometa C/2023 H2 estratto lungo la posizione  $y = 268$ . Lo spettro presenta ancora il contributo del cielo e del continuo.

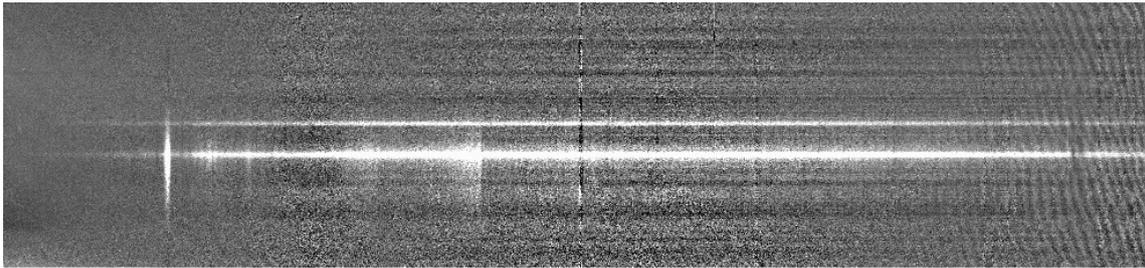
Per sottrarre il contributo della polvere e del cielo dagli spettri cometari ho utilizzato due metodi differenti: dagli spettri delle comete 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2 il cielo e il continuo sono stati sottratti con il comando *background*, mentre invece per la cometa 32P/Comas Solà per il continuo solare riflesso è stato usato l'analogo solare, mentre l'emissione atmosferica è stata rimossa con *apall*. Il comando *background* tende a rovinare i frame che presentano un segnale molto debole, introducendo molto rumore e portando a spettri finali non perfettamente piatti. Per tale motivo sono stati scelti dei passaggi di riduzione differenti per lo spettro della cometa della cometa 32P/Comas

Solà, che si può osservare in Figura 2.2 avere un segnale molto più debole rispetto a quelli delle altre due comete (Figure 2.1 e 2.3).

## 2.2.2 PARTE FINALE DELLA RIDUZIONE DEGLI SPETTRI DELLE COMETE 12P E C/2023 H2

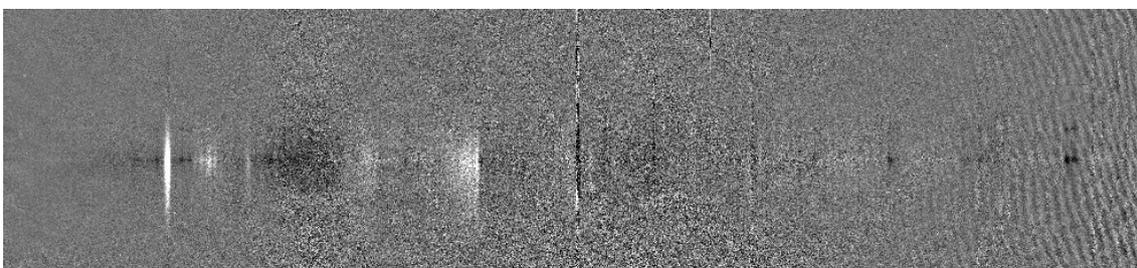
### Sottrazione del cielo e del continuo con *background*

Per le osservazioni da Terra, il cielo funge da sorgente secondaria che si sovrappone all'emissione della sorgente o delle sorgenti d'interesse. In spettroscopia longslit, le righe e bande di emissione del cielo, dovute all'illuminazione artificiale o all'atmosfera stessa, si riconoscono perché occupano l'intera lunghezza della fenditura e sono costanti in intensità. Tra le righe del cielo più intense, vi sono le righe 5577 Å, 6300 Å e 6364 Å dell'ossigeno e le righe dovute all'illuminazione artificiale, come il doppietto del sodio a 5890 Å e 5896 Å. È necessario dunque rimuovere questo contributo dall'immagine, in modo da isolare le emissioni cometarie. L'operazione è delicata perché le righe e bande di emissione degli spettri delle comete hanno una certa estensione lungo la fenditura e nella sottrazione del cielo si vuole evitare di rimuovere pure parte del segnale della cometa. Per sottrarre il cielo si esegue un fit dello spettro nella direzione della fenditura, ovvero verticalmente, lungo una colonna dell'immagine, corrispondente ad una riga del cielo sufficientemente intensa. Tale funzione interpolata viene poi sottratta a tutte le colonne, rimuovendo in questo modo il contributo del cielo dallo spettro bidimensionale. È quindi necessario avere già linearizzato correttamente lo spettro con la calibrazione in lunghezza d'onda, cioè le righe del cielo devono apparire dritte nell'immagine bidimensionale. Si è usato interattivamente il comando *background* del package *noao.imred.generic*, il quale chiede in input l'asse lungo il quale eseguire il fit (nel nostro caso l'asse  $y$ , dunque '*axis=2*') e l'intervallo di pixel dove tale interpolazione dev'essere eseguita. Il programma chiede in input la coordinata  $x$  della colonna di partenza, lungo la quale eseguire l'interpolazione, e poi si sceglie il tipo e l'ordine della funzione interpolatrice. Per entrambi gli spettri delle comete è stato scelto un polinomio di Chebyshev di ordine 3. Una volta usciti, l'interpolazione viene applicata automaticamente a tutte le colonne dell'immagine e viene creato il file sottratto di cielo. Ho determinato la regione di interpolazione andando a scegliere l'intervallo in pixel lungo la fenditura dove la banda del CN, a circa 3880 Å, diventava sufficientemente debole da essere dominata dal livello del cielo. La riga del CN è, infatti, quella più estesa e intensa nella regione in lunghezza d'onda tra 3200 Å e 7900 Å e può essere quindi usata per delimitare l'intervallo in  $y$  contenente l'emissione totale della cometa. Con tale metodo è stato anche rimosso il cielo dallo spettro della stella HR7596. In Figura 2.10 è mostrato, come esempio, lo spettro bidimensionale longslit della cometa 12P/Pons-Brooks dopo la sottrazione del contributo del cielo.



**Figura 2.10:** Spettro bidimensionale longslit della cometa 12P/Pons-Brooks in seguito alla sottrazione del cielo con *background*.

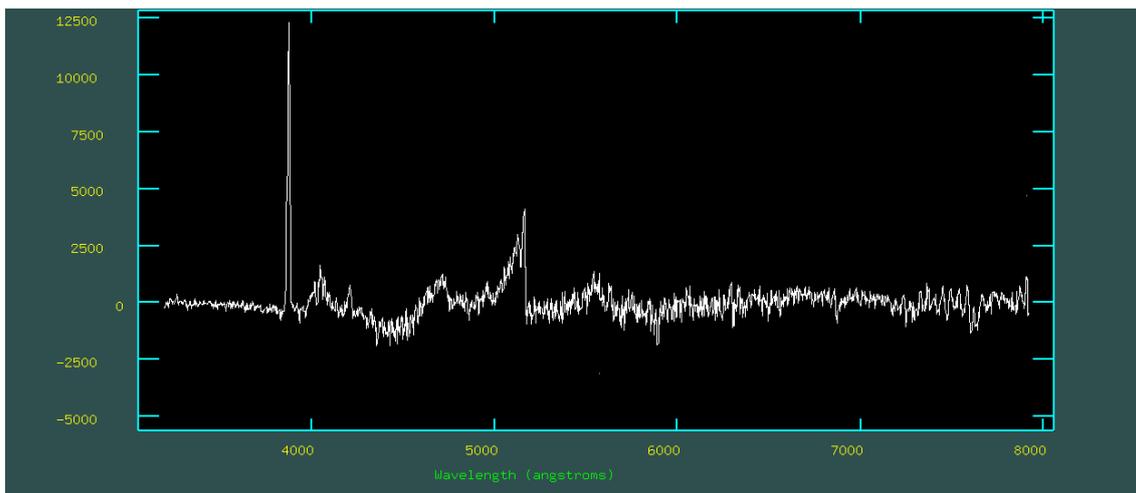
Alle bande di emissione del gas è sovrapposto il continuo solare riflesso dalle polveri della chioma cometaria. Per isolare le emissioni dei radicali neutri, è dunque necessario rimuovere tale contributo dagli spettri delle comete. Si può compiere questa operazione sui frame bidimensionali utilizzando nuovamente il comando *background*, andando a cambiare, nelle impostazioni del comando, l'asse lungo il quale eseguire l'interpolazione e la sottrazione. Essendo la dispersione in lunghezza d'onda diretta lungo l'asse orizzontale, l'interpolazione del continuo deve avvenire lungo tale direzione, perpendicolarmente alle righe del cielo. Si è dunque posto '*axis=1*' in modo da eseguire il fit lungo le righe delle immagini. Una volta eseguito il comando, viene chiesto in input un valore in *y*, corrispondente alla riga lungo la quale compiere l'interpolazione. Per entrambe le comete è stato dato il valore corrispondente al centro dello spettro cometario, corrispondente al picco d'intensità del continuo. Si può osservare che lo spettro così estratto presenta generalmente una curvatura dovuta al continuo solare diffuso dalla componente refrattaria. Nel fit è stato scelto per la cometa C/2023 H2 un polinomio di grado 1, essendo che lo spettro si presentava già molto appiattito, mentre, per la cometa 12P/Pons-Brooks, un polinomio di ordine 6 sembrava essere quello che meglio seguiva l'andamento del continuo. La funzione viene poi automaticamente sottratta a tutte le righe dell'immagine, fornendo uno spettro bidimensionale privo della componente continua. In Figura 2.11 è mostrato, come esempio, lo spettro bidimensionale della cometa 12P/Pons-Brooks in seguito alla sottrazione del contributo della polvere.



**Figura 2.11:** Spettro bidimensionale longslit della cometa 12P/Pons-Brooks in seguito alla sottrazione del cielo e del continuo con *background*.

## Estrazione dello spettro con *apall* e calibrazione in flusso

Da un frame bidimensionale è possibile estrarre uno spettro monodimensionale sommando tutto il flusso entro un certo intervallo di pixel nella direzione della lunghezza della fenditura. Per compiere tale operazione sugli spettri delle comete 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2 e sullo spettro della stella standard, è stato utilizzato il comando *apall*. La prima fase richiede, con i tasti 'l' e 'u', di selezionare un' opportuna apertura, ovvero l'intervallo in *y* contenente il flusso dell'oggetto. Avendo già rimosso il cielo, diventa più semplice distinguere l'emissione delle comete dal background. Conseguentemente, il programma mostra il grafico del *tracing*, ovvero di come cambia la posizione dell'oggetto lungo la fenditura al variare della lunghezza d'onda. Questa variazione è dovuta al fatto che lo spettro non è perfettamente allineato con le righe del CCD a causa di effetti dovuti alle ottiche o alla rifrazione differenziale dell'atmosfera. Viene allora eseguito un fit per estrarre lo spettro monodimensionale. Gli spettri monodimensionali delle comete 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2 sottratti di cielo e continuo sono mostrati rispettivamente in Figura 2.12 e 2.13.



**Figura 2.12:** Spettro monodimensionale della cometa 12P/Pons-Brooks sottratto del contributo del cielo e del continuo.

Con l'operazione precedente, si sono ottenuti gli spettri monodimensionali di entrambe le comete e della stella standard spettrofotometrica HR7596, sui quali resta da eseguire la calibrazione in flusso, che permette di convertire i valori di intensità dei pixel da conteggi di fotoni (ADU) a unità fisiche di flusso:  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ . È per questa operazione che è stata necessaria l'acquisizione dello spettro di una stella standard spettrofotometrica (come la stella HR7596), una stella di cui si conoscono i valori del flusso alle diverse lunghezze d'onda. Solitamente si tratta di stelle molto calde, con poche righe di assorbimento e con il picco di emissione nella regione blu dello spettro. Tali spettri però non si presentano necessariamente con il picco di emissione verso l'ultravioletto, a causa della curva di efficienza quantica della strumentazione.

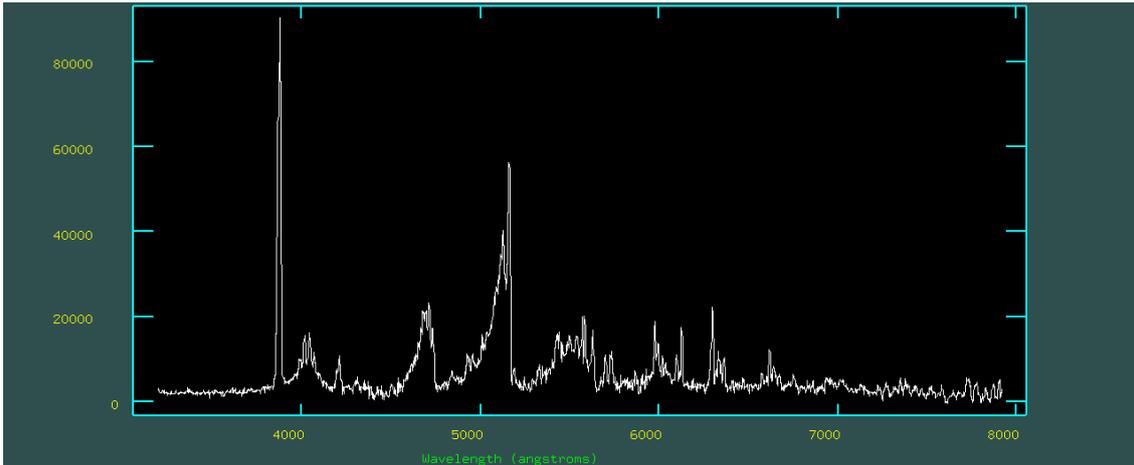


Figura 2.13: Spettro monodimensionale della cometa C/2023 H2 sottratto del contributo del cielo e del continuo.

In questo caso è stato acquisito lo spettro della stella HR7596, i cui valori di flusso sono tabulati in un file contenuto nella directory `onedstds$bstdscale` di IRAF. Uno spettro monodimensionale della stella lo si ha già dall'operazione precedente di estrazione tramite `apall`, in cui la definizione dell'apertura, per una sorgente stellare, è immediata. In questo caso è stato scelto un polinomio di Chebyshev di ordine 9 per il fit, eliminando alcuni punti che presentavano un certo scarto dal trend globale. In sequenza, sono stati poi usati i seguenti comandi:

- *standard*: una volta entrati nelle impostazioni del comando e inserito il direttorio di IRAF in cui si trova il file con i valori in flusso della stella HR7596, il nome con cui è stata salvata la stella e il file di testo contenente la curva di estinzione per l'osservatorio di Asiago, il comando è stato eseguito in maniera interattiva. Il comando *standard* adatta lo spettro monodimensionale acquisito a quello tabulato, ricampionandolo sugli intervalli di lunghezza d'onda in cui è noto il flusso calibrato. In output si ha una tabella che contiene i flussi noti della stella alle varie lunghezze d'onda e i valori in ADU misurati nello spettro osservato.
- *sensfunc*: il comando permette, in maniera interattiva, di eseguire un fit del rapporto tra i valori del flusso calibrato e i conteggi osservati, ottenendo la curva di sensibilità. La curva di sensibilità è una funzione che associa a ogni lunghezza d'onda un coefficiente moltiplicativo del flusso in unità di  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$  conteggi<sup>-1</sup>, che permette la calibrazione. Tale coefficiente varia con la lunghezza d'onda ed è più elevato nella regione blu che in quella rossa, dove l'efficienza quantica del CCD è maggiore.
- *calibrate*: una volta inserita la curva di sensibilità in '*sens*' e aver posto '*extinc=yes*' nelle impostazioni del comando, viene applicata alle immagini la calibrazione in flusso e la correzione per estinzione atmosferica. Gli spettri delle comete sono stati quindi calibrati in flusso, come ultimo passo della riduzione.

La calibrazione in flusso ha portato ad un aumento notevole dei conteggi, e dunque anche del rumore, nella regione blu del CCD, coprendo totalmente il segnale delle comete in quest'area. Gli spettri ridotti delle comete 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2, mostrati rispettivamente in Figura 3.1 e in Figura 3.3 nel Capitolo 3, sono stati dunque ristretti tra 3700 Å e 7900 Å.

### 2.2.3 PARTE FINALE DELLA RIDUZIONE DELLO SPETTRO DELLA COMETA 32P

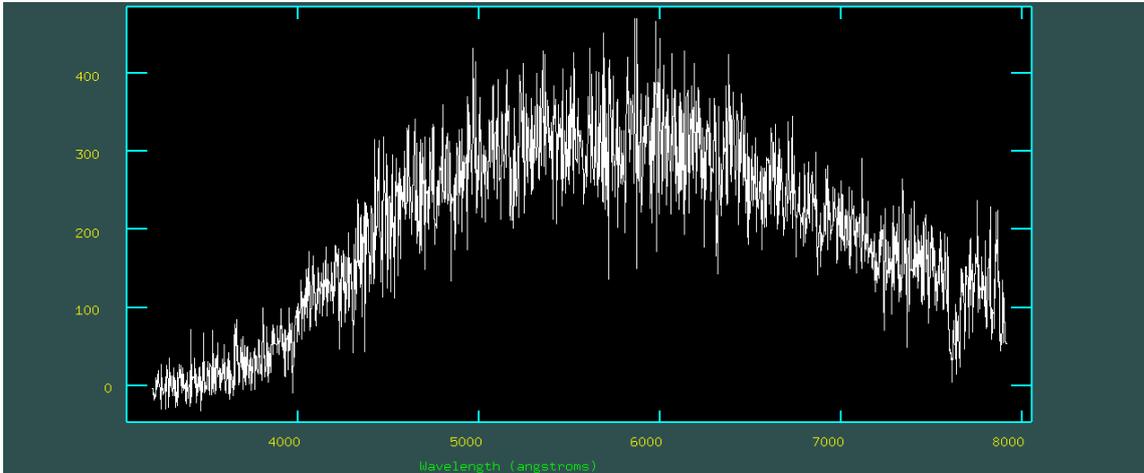
#### Estrazione dello spettro con *apall* e sottrazione del cielo

In seguito alla calibrazione in lunghezza d'onda dello spettro della cometa 32P/Comas Solà (Figura 2.8), è stato utilizzato il comando *apall* per estrarre uno spettro monodimensionale della cometa e sottrarre il contributo del cielo. Nelle impostazioni del comando si è posto '*nsum=100*', '*background = fit*' e in '*line*' è stata inserita la coordinata fisica in  $x$  di una colonna del frame che presentava un continuo sufficientemente intenso e nessuna emissione del cielo o della cometa stessa. Una volta avviato il comando, è stato necessario definire, lungo la colonna definita in '*line*', un'apertura che contenesse tutto il flusso della cometa. Aver scelto una colonna il più possibile libera da altre emissioni a parte il continuo ha permesso di semplificare tale operazione. Con il tasto '*b*' si è entrati poi in modalità *fit*, dove viene richiesto di selezionare, a sinistra e a destra della cometa, gli intervalli lungo la fenditura in cui eseguire l'interpolazione del cielo. Definite tali regioni, non troppo vicine al flusso cometario, si è scelta la funzione interpolante. In questo caso ho scelto un polinomio di Chebyshev di ordine 2. Premendo '*q*' si passa all'interpolazione del *tracing*, che dà la variazione della posizione dell'oggetto lungo la fenditura, dunque in  $y$ , al variare della lunghezza d'onda. Premendo nuovamente '*q*' ho terminato l'operazione. Il comando, oltre a dare uno spettro monodimensionale della cometa, riportato in Figura 2.14, rimuove dallo spettro l'emissione atmosferica. La stessa operazione è stata compiuta anche sullo spettro dell'analogo solare, ponendo '*nsum=10*'.

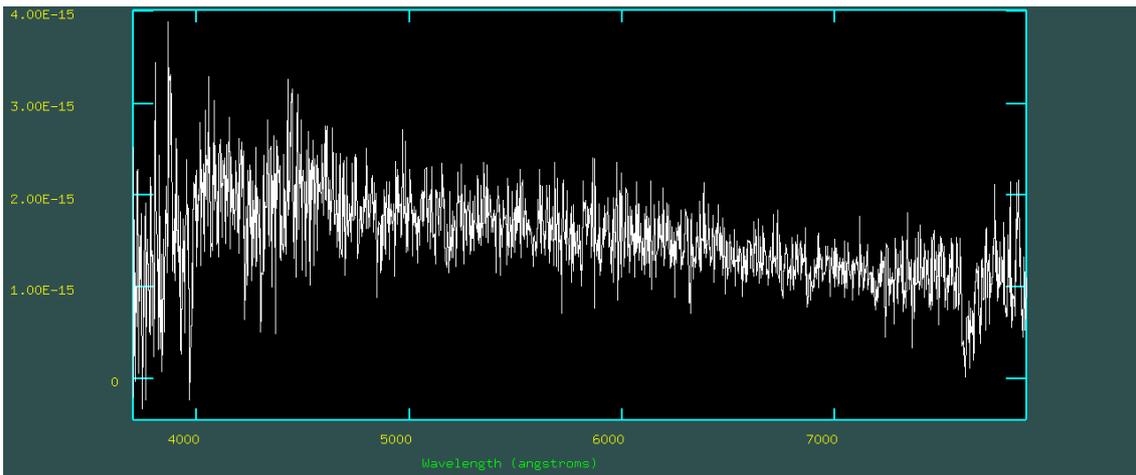
Gli spettri monodimensionali della cometa 32P/Comas Solà e dell'analogo solare sono stati poi calibrati in flusso con il comando *calibrate*. Analogamente agli spettri delle comete 12P/Pons-Brooks e C/2023 H2, anche lo spettro della cometa 32P/Comas Solà e dell'analogo solare sono stati compromessi nella regione delle lunghezze d'onda più corte in seguito alla calibrazione in flusso. Anche questi spettri sono stati ristretti all'intervallo di lunghezze d'onda da 3700 Å a 7900 Å. In Figura 2.15 è mostrato lo spettro calibrato in flusso della cometa 32P/Comas Solà nell'intervallo utile di lunghezza d'onda.

Per eseguire la sottrazione del continuo, è stato diviso, con il comando *sarith*, lo spettro della cometa 32P/Comas Solà per lo spettro dell'analogo solare normalizzato alla lunghezza d'onda di 5500 Å. La normalizzazione dello spettro è necessaria per evitare di modificare troppo il flusso della cometa nella divisione. È stato così ottenuto lo

spettro finale ridotto della cometa 32P/Comas Solà, mostrato nel Capitolo 3 in Figura 3.2.



**Figura 2.14:** Spettro monodimensionale sottratto di cielo della cometa 32P/Comas Solà. Lo spettro presenta ancora il contributo del continuo.



**Figura 2.15:** Spettro monodimensionale calibrato in flusso della cometa 32P/Comas Solà tra 3700 Å e 7900 Å. Lo spettro presenta ancora il contributo del continuo.

## CAPITOLO 3

### 3.1 RISULTATI E DISCUSSIONE

Di seguito sono mostrati, analizzati e confrontati gli spettri ridotti e calibrati delle comete 12P/Pons-Brooks (Figura 3.1), 32P/Comas Solà (Figura 3.2) e C/2023 H2 (Figura 3.3) nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 3700 Å e 7900 Å. Gli spettri sono stati visualizzati con Python.

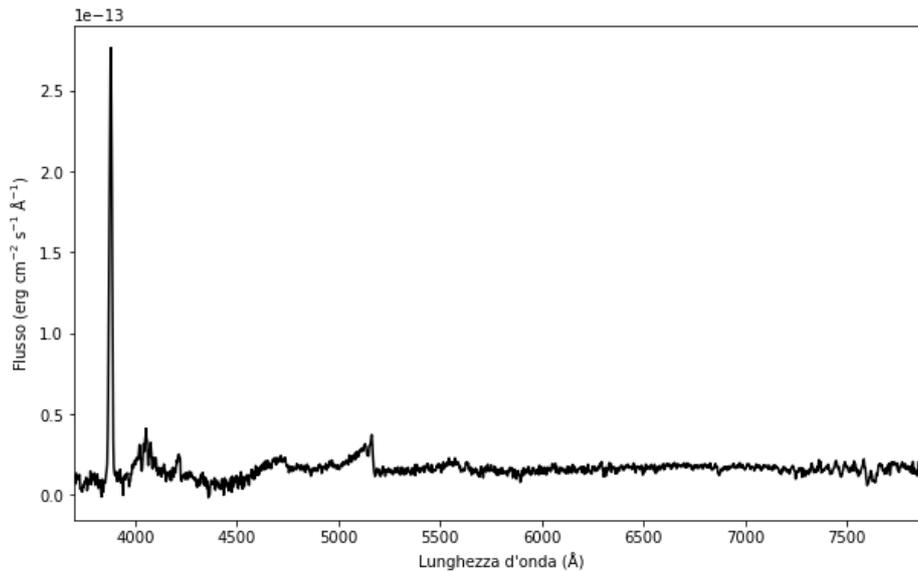


Figura 3.1: Spettro della cometa 12P/Pons-Brooks tra 3700 e 7900 Å.

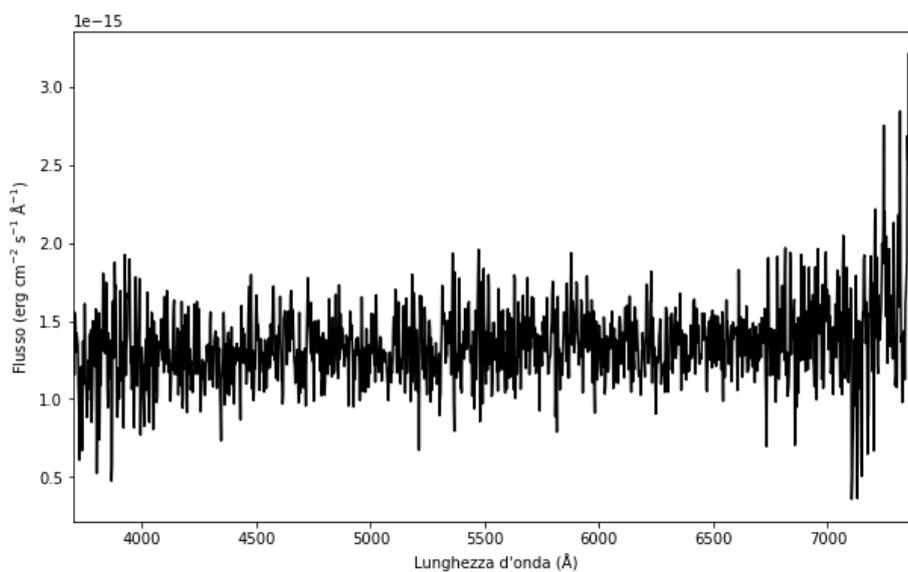


Figura 3.2: Spettro della cometa 32P/Comas Solà tra 3700 e 7900 Å.

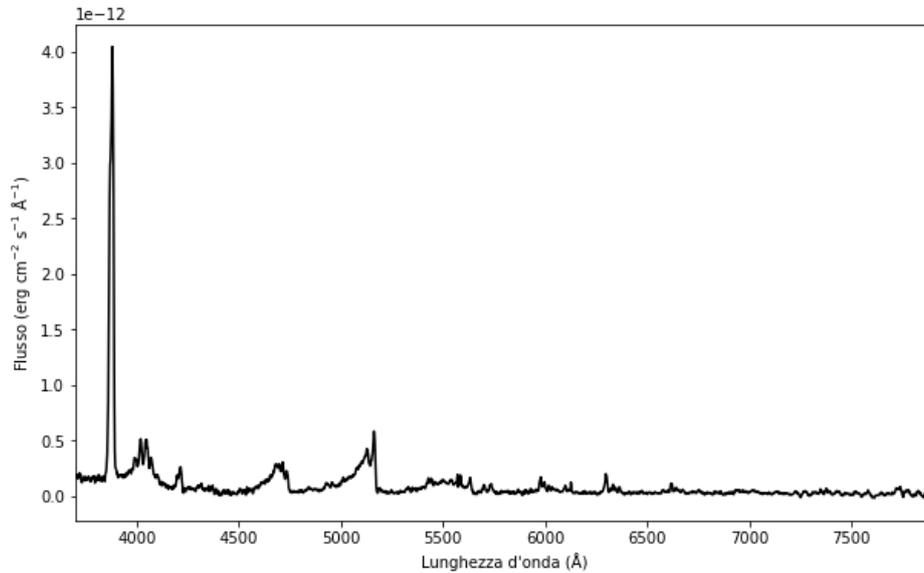


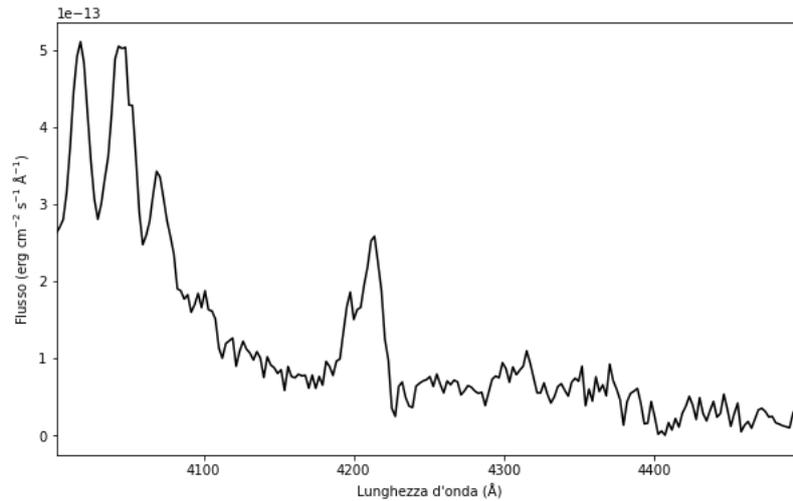
Figura 3.3: Spettro della cometa C/2023 H2 tra 3700 e 7900 Å.

A causa del *fringing*, nella regione rossa dello spettro il livello del rumore tende ad aumentare in ampiezza in tutti e tre gli spettri cometari.

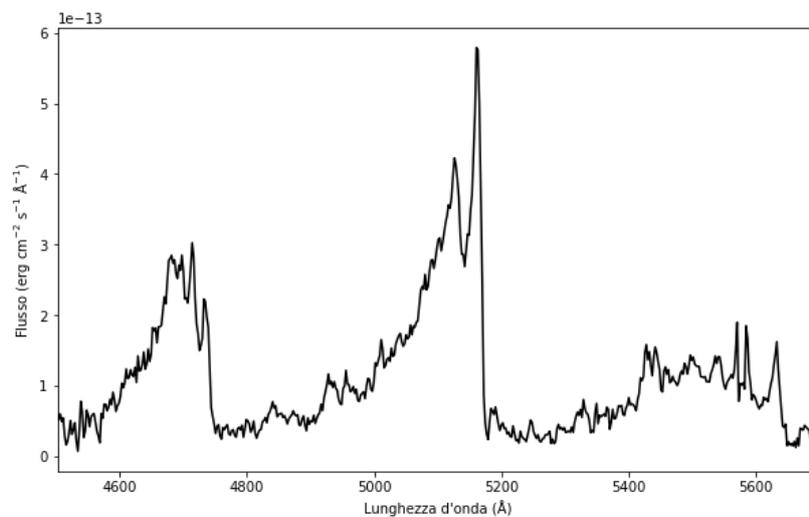
### Analisi dello spettro della cometa C/2023 H2

Nello spettro della cometa C/2023 H2 (Figura 3.3) si possono distinguere numerose righe e bande di emissione del gas della chioma cometaria. La prima emissione che si incontra è la banda  $\Delta v=0$  del CN a 3880 Å. È la banda più intensa nella regione spettrale considerata, anche se il suo flusso è stato inevitabilmente ridotto dalla fase di sottrazione del cielo, data l'estensione di tale emissione che si può osservare, nel frame bidimensionale (Figura 2.3), coprire l'intera lunghezza della fenditura. È seguita dalle emissioni del C<sub>3</sub> attorno a 4050 Å e dalla banda  $\Delta v=+1$  del CN a circa 4200 Å. Attorno a 4300 Å si possono osservare delle emissioni, possibilmente riconducibili al CH o anche all'estremamente debole banda di Swan  $\Delta v=+2$  del C<sub>2</sub>. In Figura 3.4 è mostrata nel dettaglio la regione dello spettro della cometa C/2023 H2 attorno a 4300 Å. Nella regione tra 4500 e 5700 Å, riportata in Figura 3.5, si osservano unicamente le bande di Swan  $\Delta v=+1$ ,  $\Delta v=0$  e  $\Delta v=-1$  del C<sub>2</sub>. In Figura 3.6 è riportata la regione dello spettro della cometa tra 5600 e 7100 Å, dove si possono individuare diverse bande del NH<sub>2</sub> attorno alle lunghezze d'onda di 5700 Å, 5976 Å, 6335 Å, 6600 Å e 6950 Å. A causa della limitata risoluzione spettrale, non è stato possibile distinguere le emissioni di tale radicale mescolate alle bande  $\Delta v=0$  e  $\Delta v=-1$  del C<sub>2</sub>. A 6300 Å e 6364 Å, si può osservare il doppietto dell'[OI], di possibile natura cometaria anziché atmosferica, siccome la

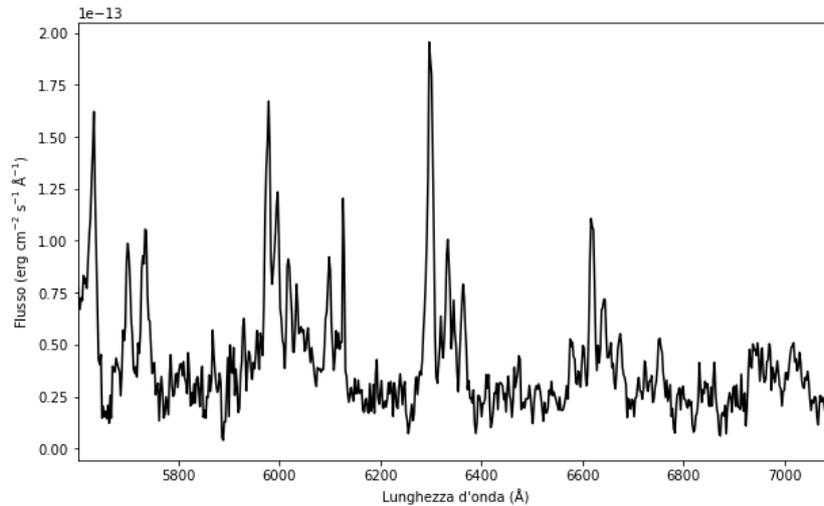
cometa si trovava già a distanza eliocentrica  $r < 1$  AU all'epoca di osservazione. Oltre i 7000 Å, non si osserva alcuna emissione. La regione è dominata dal rumore, rendendo, ad esempio, impossibile individuare la banda del  $\text{NH}_2$  attorno a 7350 Å. Le emissioni neutre della chioma osservate nello spettro della cometa C/2023 H2, nonostante l'assenza del radicale NH, sono compatibili con le emissioni attese da una cometa a una distanza eliocentrica di  $r = 0.93$  AU. Lo spettro presenta un buon rapporto segnale-rumore, con un livello del background molto basso.



**Figura 3.4:** Spettro della cometa C/2023 H2 tra 4000 e 4500 Å. A 4050 Å si osservano le emissioni del  $\text{C}_3$ , a 4200 Å la banda  $\Delta v=+1$  del CN e attorno a 4300 Å si osservano emissioni dovute al CH o alla banda  $\Delta v=+2$  del  $\text{C}_2$ .



**Figura 3.5:** Spettro della cometa C/2023 H2 tra 4500 e 5700 Å. Si osservano le bande di Swan  $\Delta v=+1$ ,  $\Delta v=0$  e  $\Delta v=-1$  del  $\text{C}_2$  attorno alle lunghezze d'onda di 4700 Å, 5100 Å e 5500 Å rispettivamente.



**Figura 3.6:** Spettro della cometa C/2023 H2 da 5600 a 7100 Å. Si identificano diverse bande del NH<sub>2</sub> alle lunghezze d'onda di 5700 Å, 5979 Å, 6335 Å, 6600 Å e 6950 Å. Si osserva inoltre il doppietto dell'[OI] a 6300, 6364 Å, di probabile origine cometaria.

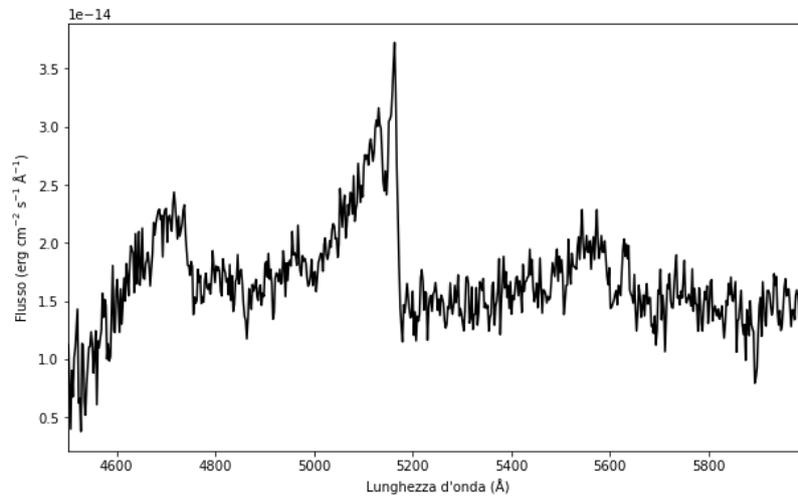
### **Analisi dello spettro della cometa 12P/Pons-Brooks**

Lo spettro della cometa 12P/Pons-Brooks, riportato in Figura 3.1, mostra globalmente meno emissioni rispetto allo spettro della cometa C/2023 H2 ed un minore rapporto segnale-rumore. Lo spettro è dominato dall'estesa emissione del radicale CN a 3880 Å. Attorno a 4050 Å si può identificare la banda del C<sub>3</sub> e a 4300 Å la banda  $\Delta v=-1$  del CN. Non si osservano le emissioni del CH a 4300 Å, non ancora comparsa alla distanza eliocentrica di  $r = 2.62$  AU. Nella regione tra 4500 Å e 6000 Å, riportata in Figura 3.7, si possono individuare le bande di Swan del C<sub>2</sub>, seppur meno intense e con un maggior livello del rumore rispetto a quelle osservate nello spettro della cometa C/2023 H2. In Figura 3.7 è mostrata la regione dello spettro della cometa 12P/Pons-Brooks tra 4500 Å e 6000 Å. Oltre i 6000 Å, non si riesce a identificare alcuna ulteriore emissione del gas: la regione appare costituita interamente dal rumore, che copre possibili emissioni deboli. All'epoca dell'osservazione, la cometa si trovava a una distanza eliocentrica  $r$  di circa 2.62 AU, quasi 3 AU, compatibile con le poche bande osservate nello spettro, essendo ancora troppo lontana dal Sole affinché la maggior parte dei gas potessero sublimare.

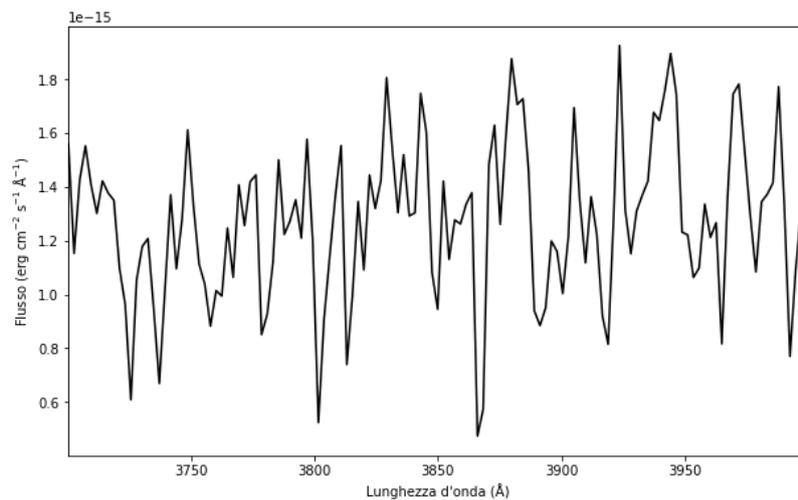
### **Analisi dello spettro della cometa 32P/Comas Solà**

Lo spettro della cometa periodica 32P/Comas Solà, riportato in Figura 3.2, appare fortemente dominato dal rumore, che rende difficile distinguere possibili emissioni cometarie deboli. Non si identifica alcuna banda, nemmeno quella del CN a 3880 Å (Figura 3.8). Osservando lo spettro non ancora sottratto del continuo (Figura 2.14), si

può vedere come domini l'andamento dello spettro solare riflesso dalla polvere, conferendo alla cometa un carattere quasi asteroidale.



**Figura 3.7:** Spettro della cometa 12P/Pons-Brooks tra 4500 e 6000 Å. Si osservano le bande di Swan  $\Delta v=+1$ ,  $\Delta v=0$  e  $\Delta v=-1$  del C<sub>2</sub> attorno alle lunghezze d'onda di 4700 Å, 5100 Å e 5500 Å rispettivamente.



**Figura 3.8:** Spettro della cometa 32P/Comas Solà tra 3700 e 4000 Å. La regione è costituita interamente dal rumore, non si osserva la banda  $\Delta v=0$  del CN a 3880 Å.

## Discussione

Il rapporto segnale-rumore di uno spettro astronomico dipende dal tempo di esposizione e dall'intensità del segnale rispetto al cielo e al rumore strumentale. Se la sorgente è abbastanza brillante, si ottengono spettri in cui il rumore è relativamente basso, permettendo di distinguere e riconoscere caratteristiche spettrali con maggiore accuratezza, limitata principalmente dalla risoluzione spettrale. Se l'oggetto d'interesse è invece poco brillante e domina il background, il livello del rumore tende a coprire la maggior parte delle emissioni, rendendo difficile il riconoscimento di righe e bande.

Degli spettri analizzati in questo elaborato, lo spettro della cometa C/2023 H2 è quello con il miglior rapporto segnale-rumore, a fronte di un segnale più intenso. La cometa C/2023 H2 si presenta quindi come più brillante sul CCD rispetto alle comete 12P/Pons-Brooks e 32P/Comas Solà e ciò si può osservare confrontando gli spettri grezzi in Figura 2.1, 2.2 e 2.3. La cometa è a lungo periodo ( $>2000$  anni) e si trovava, all'epoca di osservazione, più vicina al Sole e alla Terra rispetto alle altre due comete studiate ( $r$  e  $\Delta$  in Tabella 2.4). L'intensità osservata di un oggetto sul CCD, misurato nei pixel come conteggi di fotoni, dipende da quanto l'oggetto appare brillante all'osservazione, ovvero dalla sua magnitudine. La magnitudine di una cometa attiva dipende dalla distanza eliocentrica, dalla distanza geocentrica e da un parametro  $n$  legato all'attività cometaria (Equazione 1.2). Dalla Tabella 2.4, si può facilmente vedere come la cometa C/2023 H2 presentasse il minor valore in magnitudine e dunque apparisse, delle tre comete, come la più brillante, portando a un maggior rapporto segnale-rumore, nonostante il minore tempo di esposizione. Dal confronto dei frame bidimensionali (Figure 2.1, 2.2 e 2.3), si può anche vedere come la banda del CN a  $3880 \text{ \AA}$ , utilizzata per stimare la dimensione della chioma neutra, sia più estesa e più intensa nello spettro della cometa C/2023 H2, dove arriva a coprire l'intera lunghezza della fenditura. Nella posa della cometa 12P/Pons-Brooks, tale banda è già più contenuta, mentre, nello spettro bidimensionale della cometa 32P, è praticamente assente. La cometa C/2023 H2 presenta al CCD una chioma più intensa ed estesa, dovuta alla maggiore vicinanza all'osservatore e alla maggiore attività cometaria, trovandosi molto più vicina al Sole, in prossimità del perielio a  $q = 0.89 \text{ AU}$ . La chioma di una cometa tende, infatti, a espandersi all'avvicinarsi della cometa al Sole, a causa dell'aumento dell'irraggiamento solare e dunque del tasso di produzione  $Q$ , che comporta un numero maggiore di emettitori. Comete con un periodo molto breve, come la cometa 32P/Comas Solà, presentano generalmente un'emissione cometaria molto debole o perfino assente, avendo sviluppato un mantello roccioso isolante sostanzievole a seguito di ripetuti passaggi al perielio, portando a una diminuzione della luminosità di tali oggetti. Si può osservare come lo spettro della cometa 32P/Comas Solà (Figura 3.2) sia molto più debole rispetto a quello delle altre due comete (Figure 3.1 e 3.3).

Lo spettro della cometa 32P/Comas Solà presenta un rapporto segnale-rumore estremamente basso, impedendo di distinguere dal rumore alcuna emissione. La cometa 32P/Comas Solà si presenta dunque come un oggetto poco luminoso e quasi del tutto inattivo, il cui spettro è dominato dal continuo solare riflesso dalla componente refrattaria. Le comete 12P/Pons-Broks e 32P/comas Solà si trovavano, all'epoca di osservazione, a distanze eliocentriche simili ( $2 < r < 3$ ), con la cometa 12P/Pons-Brooks quasi il doppio più distante dalla Terra (Tabella 2.4). Ciononostante, la cometa 12P/Pons-Brooks mostra uno spettro più chiaro e pulito con bande più intense e distinguibili. La ragione della bassa brillantezza della cometa 32P/Comas Solà è dunque imputabile al suo breve periodo orbitale come cometa della famiglia di Giove (JFC) e dunque a un'evoluzione della cometa in un oggetto oramai di carattere più asteroidale che cometario. Anche la cometa 12P/Pons-Brooks è classificata come cometa a corto periodo, con un periodo orbitale maggiore rispetto alla 32P/Comas Solà, circa 71.24 anni, ed è molto più attiva. Trovandosi a maggiore distanza dal Sole e dalla Terra, la cometa 12P/Pons-Brooks presenta uno spettro meno intenso rispetto alla cometa C/2023 H2, con meno bande visibili, poiché la maggior parte dei gas intrappolati nei ghiacci cometari non sono ancora sublimati efficacemente a tali distanze.

### 3.2 CONCLUSIONI

In questa tesi è stata eseguita l'analisi spettroscopica della chioma delle comete 12P/Pons-Brooks, 32P/Comas Solà e C/2023 H2 (Lemmon). Gli spettri bidimensionali a fenditura lunga sono stati ottenuti la notte tra il 12 e il 13 novembre 2023 al telescopio Galileo da 122 cm ad Asiago, al quale era montato uno spettrografo Boller & Chivens. Con il software IRAF, gli spettri sono poi stati ridotti. Per una migliore rappresentazione e analisi degli spettri cometari ridotti, questi sono stati ristretti all'intervallo di lunghezze d'onda da 3700 Å a 7900 Å, senza la perdita di alcuna emissione significativa.

La cometa C/2023 H2 era la più vicina al Sole e alla Terra all'epoca di osservazione ed è una cometa a lungo periodo ( $P = 3730.93$  anni), risultando la più luminosa e attiva delle tre. Il suo spettro è ricco di bande di emissione, tra cui la banda  $\Delta v=0$  del CN a 3880 Å, che è la più intensa. Si osservano anche le emissioni del C<sub>3</sub> attorno a 4050 Å e la banda  $\Delta v=+1$  del CN a circa 4200 Å. Tra 4500 e 5700 Å, sono presenti le bande di Swan del C<sub>2</sub> ( $\Delta v=+1$ ,  $\Delta v=0$ ,  $\Delta v=-1$ ), e tra 5600 e 7100 Å si individuano diverse bande del NH<sub>2</sub>, sebbene mescolate alle bande del C<sub>2</sub>. Il doppietto dell'[OI] a 6300, 6364 Å potrebbe avere origine cometaria. Lo spettro della cometa mostra un rapporto segnale-rumore elevato, con un basso livello del rumore. Lo spettro della cometa 12P/Pons-Brooks è meno ricco di bande rispetto a quello della C/2023 H2 e presenta un minore rapporto segnale-rumore. Anche qui, la banda CN a 3880 Å è dominante, ma meno

intensa ed estesa. Sono visibili la banda del  $C_3$  a 4050 Å, la banda  $\Delta v=-1$  del CN a 4300 Å e le bande di Swan del  $C_2$  tra 4500 e 5700 Å. A differenza della cometa C/2023 H2, non si osservano le emissioni del CH, e oltre i 6000 Å lo spettro è dominato dal rumore, impedendo l'identificazione di ulteriori bande, come quelle del  $NH_2$  e dell'[OI]. Lo spettro della cometa 32P/Comas Solà è il più debole dei tre, costituito interamente dal rumore e privo di alcuna emissione cometaria identificabile.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A'Hearn, M. F., 2011, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 281-299
- [2] Biermann, L. 1951, *Zeitschrift für Astrophysik*, 29, 274
- [3] Bolte, M., "Signal-to-Noise in Optical Astronomy.", Class Notes for AY257: Modern Observational Techniques, University of California, Santa Cruz, Fall 2015, [https://www.ucolick.org/~bolte/AY257/s\\_n.pdf](https://www.ucolick.org/~bolte/AY257/s_n.pdf)
- [4] Bryssinck, E. 2015, [https://www.astronomie.be/erik.bryssinck/c2014q2\\_20150206.html](https://www.astronomie.be/erik.bryssinck/c2014q2_20150206.html)
- [5] Ciroi, S. & Cracco, V., Dispense del corso di Laboratorio di astronomia, a.a. 2014/2015
- [6] Cremonese, G., Boehnhardt, H., Crovisier, J., et al. 1997, *ApJL*, 490, L199
- [7] Edgeworth, K. E. 1943, *Journal of the British Astronomical Association*, 53, 181
- [8] Elidoro, C. 1996, "I corpi minori del Sistema Solare",
- [9] Fulle, M., Leblanc, F., Harrison, R. A., et al. 2007, *ApJL*, 661, L93
- [10] Jewitt, D. 1992, Physical properties of cometary nuclei in *Observations and Physical Properties of Small Solar System Bodies*. In *Proceedings of the Liege International Astrophysical Colloquium 30*, Liege, Belgium, 24–26 June 1992; Brahic, A., Gerard, J.-C., Surdej, J., Eds.; Université de Liege, Institut d'Astrophysique: Liege, Belgium, pp. 85–111
- [11] Johnson, R.E., Cooper, J.F., Lanzerotti, L.J., Strazzulla, G. 1987, *Radiation formation of a non-volatile comet crust*. *Astron. Astrophys.*, 187, 889–892
- [12] Kuiper, G. P. 1951, *Proceedings of the National Academy of Science*, 37, 1
- [13] Oort, J. H. 1950, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 11, 91
- [14] Pizzella, A., IRAF: Riduzione dati Spettroscopici longslit, a.a. 2013/2014
- [15] Strazzulla, G., Baratta, G.A., Johnson, R.E., Donn, B. 1991, *Primordial comet mantle: Irradiation production of a stable organic crust*, *Icarus*, 91, 101–104
- [16] Swamy, K. S. K. 1986, *Physics of Comets*

[17] Wehinger, P.A., Wyckoff, S., et al. 1973f, ApJ, 190, L43, Plate L1

[18] Whipple, F. L. 1950, ApJ, 111, 375

[19] Wyckoff, S. 1981, “Ground-based cometary spectroscopy”, Arizona State University, Tempe,

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19820006134/downloads/19820006134.pdf>