

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea in Astronomia

TESI DI LAUREA

Risultati dallo studio degli oggetti interstellari: 1I/Oumuamua e 2I/Borisov

Relatore:

Prof.ssa Monica Lazzarin

Laureando:

Daide Mazzarello

Matricola 1162902

Anno Accademico 2022-2023

*Alla mia famiglia,
che per prima mi ha mostrato la via delle stelle*

Sommario

Dal 2017 sono stati scoperti due corpi interstellari all'interno del Sistema solare, entrambi di natura distinta. Il primo oggetto, 1I/Oumuamua, passato entro 63 distanze lunari dalla Terra, appariva asteroidale privo di livelli rilevabili di perdita di gas o polvere, ma mostrava un'accelerazione di tipo non-gravitazionale.

Il secondo oggetto interstellare, 2I/Borisov, era distinto da 1I/Oumuamua in termini di proprietà fisiche e di massa e mostrava una coda cometaria molto definita. Esaminiamo le scoperte di questi corpi, le successive osservazioni e caratterizzazioni, e le ipotesi teoriche sulla loro origine.

I prossimi osservatori dovrebbero rilevare molti più planetesimi interstellari che potrebbero offrire nuove intuizioni su come i processi di formazione planetaria variano e si sviluppano in tutta la Galassia.

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Oggetti interstellari	7
2	1I/Oumuamua	9
2.1	Forma	10
2.2	Accelerazione non gravitazionale	12
2.3	Origini di 1I/Oumuamua	15
3	2I/Borisov	19
3.1	Proprietà della chioma	20
3.2	2I/Borisov in rapporto alle comete del Sistema solare	23
4	Prospettive future	25
	Bibliografia	29

Capitolo 1

Introduzione

Per centinaia di anni prima della scoperta di 1I/Oumuamua e 2I/Borisov, gli astronomi avevano ipotizzato che la galassia possedesse un gran numero di corpi espulsi da sistemi planetari extrasolari.

Già nel 1705 Edmond Halley propose la possibilità che una cometa potesse provenire dallo spazio interstellare, mentre circa un secolo dopo, nel 1812, William Herschel svolse osservazioni dettagliate di due comete, le quali avevano livelli di luminosità diversi nonostante le distanze del perielio simili. Le differenze di luminosità lo portarono a ipotizzare che alcune comete potessero originarsi oltre il Sistema solare, e che i livelli variabili di attività potessero essere attribuiti all'accumulo di materia sulla superficie delle stesse nello spazio interstellare.

Ma fu solo grazie al lavoro dell'astronomo italiano Giovanni Schiaparelli tra il 1866 e il 1867 se si riuscì a quantificare le proprietà che avrebbero dovuto avere le comete interstellari, ossia un'orbita di tipo largamente iperbolica, avendo per primo considerato il movimento proprio del sole attorno al centro galattico.

Al giorno d'oggi si è scoperto come le comete erranti siano solo uno dei molti tipi di corpi celesti facenti parte di una nuova classe di oggetti osservabili che stanno diventando sempre più importanti, ossia gli oggetti interstellari.

1.1 Oggetti interstellari

Un oggetto interstellare è un corpo celeste come un asteroide, una cometa o un pianeta errante, che non è legato gravitazionalmente ad alcuna stella. Questo termine può anche essere applicato ad un oggetto che si trova su una traiettoria interstellare ma sta temporaneamente transitando vicino ad un astro.

I primi oggetti interstellari scoperti furono dei pianeti erranti, ossia espulsi dal loro sistema stellare di origine (ad esempio, OTS 44 oppure Cha 110913-

773444), sebbene siano difficili da distinguere dalle nane brune e non vi sia ancora un consenso generale sulla loro natura. Il primo oggetto interstellare confermato è stato invece 1I/Oumuamua, scoperto da Robert Weryk il 19 ottobre 2017 dalla sommità del vulcano Haleakala, nelle Hawaii.

È stato identificato durante le operazioni del progetto Pan-STARRS, un'indagine a tutto cielo finalizzata alla rilevazione di piccoli corpi del Sistema solare. Il sistema utilizza due telescopi da 1.8 metri, è sensibile fino ad una magnitudine limite di $V = 22$ e produce immagini notturne con una risoluzione di circa 6000 deg^2 .

Il secondo oggetto interstellare noto, 2I/Borisov (noto anche come C/2019 Q4), è stato scoperto il 30 agosto 2019 a soli 38° dal Sole. Questa straordinaria osservazione è stata effettuata da Gennadiy Borisov che ha utilizzato un telescopio autocostruito da 0.65 m per puntare un'area del cielo intenzionalmente non esaminata da altri telescopi poiché troppo vicino al Sole.

Le rilevazioni di 1I/Oumuamua e 2I/Borisov hanno aperto una nuova era nell'astronomia perché mai prima d'ora siamo stati in grado di studiare da vicino oggetti che, molto probabilmente, provengono da sistemi planetari extrasolari e sono rimasti sostanzialmente immutati dalla loro espulsione, come capsule temporali del loro sistema planetario.

Capitolo 2

1I/Oumuamua

1I/Oumuamua è stato osservato molto vicino a noi, transitava a circa 0,16 UA di distanza dalla Terra, ed è passato nella posizione di perigeo solamente tre giorni prima della sua effettiva scoperta.

Questo può implicare l'esistenza di una popolazione inosservata di oggetti simili ma con geometrie di osservazione meno favorevoli.

Il corpo è stato inizialmente contrassegnato come un oggetto vicino alla Terra (NEO) potenzialmente pericoloso, e solo dopo pochi giorni di osservazioni coordinate a livello globale, in cui comunque 1I/Oumuamua è risultato essere puntiforme, dal momento che era significativamente troppo lontano per ottenere immagini ben risolte, l'orbita dell'oggetto è stata confermata essere iperbolica, con un'eccentricità $e = 1.198$, la più alta mai osservata al tempo. Calcolando successivamente la traiettoria dell'oggetto si è visto che possedeva un'inclinazione di $122,8^\circ$ rispetto all'eclittica e una distanza al perielio di circa 0,255 UA.

La possibilità che fosse un oggetto del Sistema solare che era stato perturbato gravitazionalmente su una traiettoria non vincolata è stata rapidamente esclusa; infatti, la traiettoria iperbolica ha confermato che l'oggetto non poteva essersi originato all'interno del nostro Sistema solare e doveva provenire da un altro luogo.

Subito dopo l'annuncio della scoperta di 1I/Oumuamua è stato ottenuto il primo spettro ottico della sua superficie il 25 ottobre 2017 con il telescopio Hale di 5 metri sul Monte Palomar. Lo spettro si estendeva da 520 a 950 nm ed era molto arrossato, sono state effettuate ulteriori immagini e osservazioni spettroscopiche su 1I/Oumuamua la notte successiva con lo stesso telescopio che ha indicato un colore superficiale rossastro, probabilmente dovuto a composti organici che sono rimasti per milioni di anni sotto l'azione dei raggi cosmici.

Durante le stesse sere mediante il Nordic Optical Telescope (NOT) di 2.5 metri di diametro situato nelle Isole Canarie e il telescopio WIYN, situato al Kitt Peak National Observatory in Arizona sono stati misurati i colori del

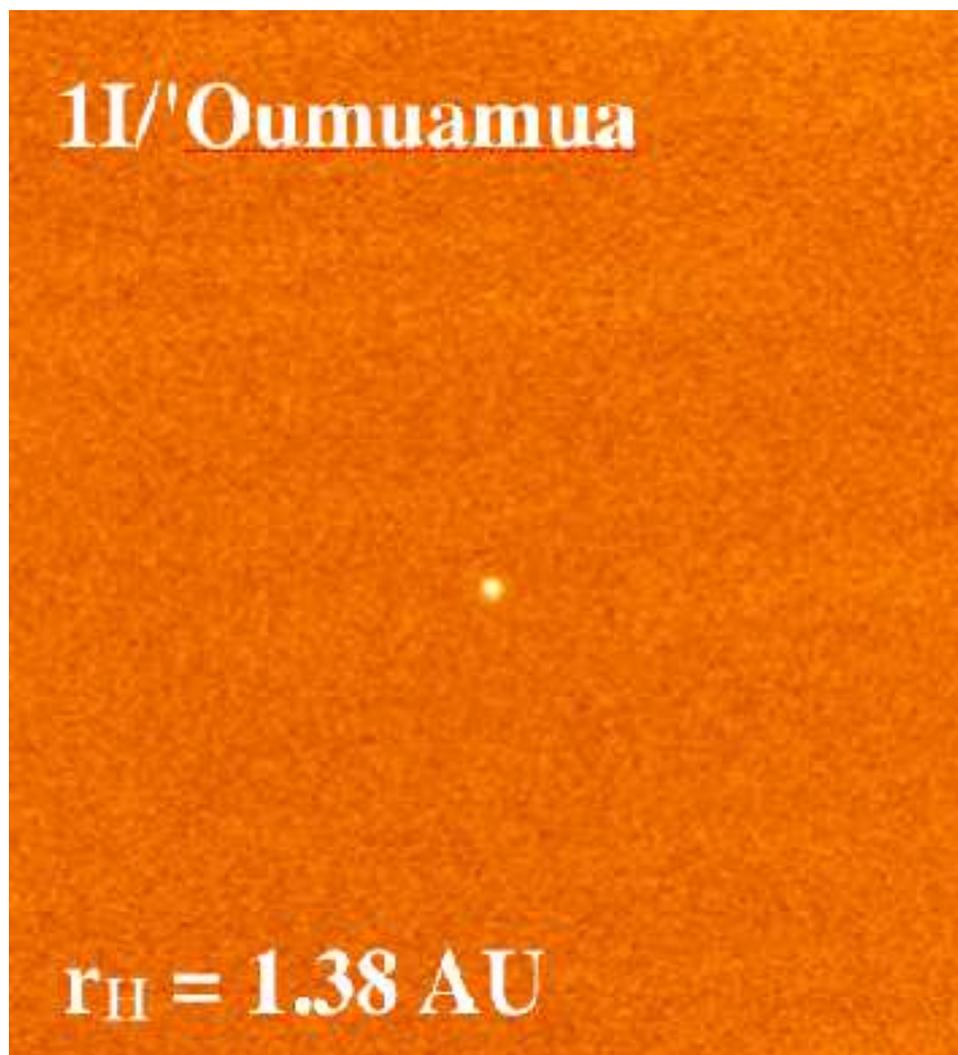


Figura 2.1: Un'immagine di 1I/Oumuamua ripresa con il Nordic Optical Telescope da 2.5 m il 26 ottobre 2017. Come si può vedere l'oggetto non mostra alcun tipo di attività cometaria distinta. Nella figura, r_H corrisponde alla distanza eliocentrica dell'oggetto quando è stata scattata l'immagine.

nucleo del corpo celeste, ottenendo $B-V = 0,70 \pm 0,06$, $V-R = 0,45 \pm 0,05$.

2.1 Forma

Dalle curve di luce invece, ottenute mediante lo strumento FORS (FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph) sul VLT si è notata una drastica variazione di luminosità durante la rotazione dell'oggetto, una ogni 7.3 ore. L'ampio intervallo di luminosità è risultato essere di circa un fattore dieci,

ossia 2.5 magnitudini, e si scoprì che questo era dovuto alla forma molto particolare di 1I/Oumuamua, che presentava proporzioni piuttosto anomale. Per calcolare il rapporto assiale inizialmente si calcola il raggio effettivo del corpo, che è semplicemente il raggio di un cerchio di uguale area del corpo di partenza, per mezzo della formula:

$$2 \left(\frac{r_n}{1km} \right) = \left(\frac{1329}{\sqrt{p}} \right) 10^{-0.2H} \quad (2.1)$$

dove r_n è il raggio effettivo espresso in chilometri, p è l'albedo geometrica e H è la magnitudine assoluta che è risultata essere 22,4 per 1I/Oumuamua. Inoltre, la forma di un corpo irregolare proiettato sul piano celeste può essere approssimata ad un ellissoide con semiassi a e b , legati a r_n per mezzo della relazione $r_n = \sqrt{ab}$. Sostituendo i dati per 1I/Oumuamua è risultato un rapporto assiale di circa 10:1. Tuttavia, non si è ancora considerato il fatto che la maggior parte delle osservazioni sono state compiute ad angoli di fase di 20° , dove l'illuminazione e le ombre autoprodotte modificano l'ampiezza della curva di luce. Tenendo conto di questi effetti, il rapporto degli assi di 1I/Oumuamua corrispondente è stato ridotto a $b/a = 6:1$.

Questo rapporto assiale indica comunque una forma estrema rispetto ai corpi noti del Sistema solare; infatti, le forme degli asteroidi sono dovute a ripetute collisioni con altri corpi, talvolta anche totalmente distruttive. Anche per questi casi violenti, i rapporti medi degli assi sono di circa $b/a=1,4:1$ e valori maggiori di 2 sono rari.

Inoltre, i corpi allungati del Sistema solare sono tipicamente di forma prolata e ruotano attorno a un asse minore. La grande ampiezza della curva di luce di 1I/Oumuamua potrebbe anche essere prodotta da un corpo oblatto

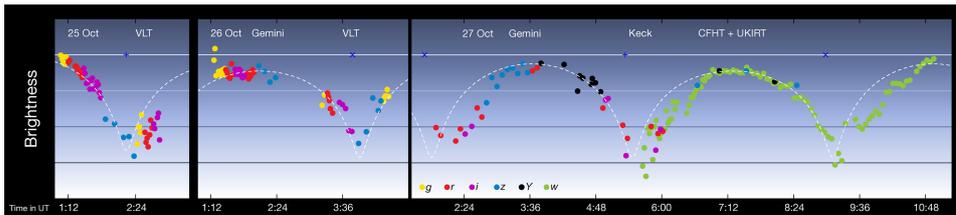


Figura 2.2: Il grafico mostra la variazione di luminosità dell'asteroide interstellare Oumuamua nel corso di tre giorni nell'ottobre 2017. L'ampio intervallo di luminosità di circa un fattore dieci (ossia 2.5 magnitudini) è dovuto alla forma allungata di questo oggetto singolare, che ruota ogni 7.3 ore. I punti di diversi colori rappresentano misure in diversi filtri, che coprono la banda spettrale del visibile e del vicino infrarosso. La linea tratteggiata mostra la curva di luce attesa nel caso in cui Oumuamua sia un ellissoide con un rapporto assiale di 1:10. Le deviazioni da questa curva sono probabilmente dovute a irregolarità della forma dell'asteroide o dell'albedo superficiale

che ruota attorno a un asse lungo.

Calcoli numerici e analitici dettagliati hanno dimostrato che la forma più probabile di 1I/Oumuamua è un ellissoide oblatto con un rapporto assiale di 6:6:1, in contrasto con la geometria prolata 6:1:1 resa popolare da diverse impressioni artistiche.

Statisticamente, infatti, è più probabile che un corpo oblatto orientato in modo casuale con un dato rapporto assiale produca una grande ampiezza della sua curva di luce in modo coerente durante ogni rotazione rispetto alla sua controparte prolata. In questo senso, dovremmo presumere che 1I/Oumuamua sia simile ad un corpo appiattito, simile ad un disco, piuttosto che ad uno allungato, a forma di sigaro.

Infine, è anche possibile che la curva di luce di 1I/Oumuamua possa derivare da variazioni azimutali dell'albedo piuttosto che da risultanti dalla forma del corpo. Nei corpi del Sistema solare, tuttavia, questo tipo di variazioni sono quasi sempre così piccole da essere trascurabili. La ragione fisica è che il materiale di superficie è stato reso molto omogeneo sia dal bombardamento dei micrometeoriti che dall'erosione dovuta alla continua esposizione ai raggi cosmici.

Questi processi, agendo insieme o da soli, rendono uniformi le superfici di quasi tutti gli asteroidi e le comete nel Sistema solare. L'unica eccezione degna di nota è il satellite di Saturno Giapeto, di circa 1500 km di diametro, dal momento che presenta variazioni emisferiche di albedo anche di un rapporto di 10:1. Giapeto è un caso speciale, comunque, perché il satellite si trova in una risonanza orbitale con un altro satellite di Saturno, Febe, esponendo un emisfero all'impatto dei detriti mentre l'altro ne risulta totalmente illeso.

È dunque difficile immaginare come una simile asimmetria possa sorgere sulla superficie di un corpo quando fluttua liberamente nello spazio interstellare. Pertanto, benché la possibilità che la curva di luce di 1I/Oumuamua sia causata da variazioni estreme dell'albedo azimutale non possa essere formalmente respinta, sembra meno plausibile di un'origine nella forma del corpo.

2.2 Accelerazione non gravitazionale

Nonostante non si sia riuscito ad ottenere immagini ben risolte di 1I/Oumuamua, un altro aspetto che fu subito chiaro era la mancanza di attività di degassamento. Conseguentemente le misurazioni del profilo di luminosità della superficie di 1I/Oumuamua sono state utilizzate per ottenere quantità dipendenti dal modello sulla perdita di massa di particelle di dimensioni micrometriche. Il valore ottenuto è risultato compreso tra $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$ e $2 \cdot 10^{-3} \text{ kg s}^{-1}$, che è comunque ordini di grandezza inferiori ai tassi medi

Tabella 2.1: Tassi di emissioni di vari elementi volatili di 1I/Oumuamua

Specie	Proprietà fisica	Valore [molecole s ⁻¹]	Distanza [UA]
CN	Q(CN)	< 2 · 10 ²²	1.4 UA
C ₂	Q(C ₂)	< 4 · 10 ²²	1.4 UA
C ₃	Q(C ₃)	< 2 · 10 ²¹	1.4 UA
OH	Q(OH)	< 1.7 · 10 ²⁷	1.8 UA
CO ₂	Q(CO ₂)	< 9 · 10 ²²	2.0 UA
CO	Q(CO)	< 9 · 10 ²³	2.0 UA

di perdita di massa delle comete vicine al Sole stimate allo stesso modo, che oscillano tra i 10² kg s⁻¹ e i 10³ kg s⁻¹.

Il moto di qualsiasi corpo celeste nel Sistema solare è governato prevalentemente dalla gravità del Sole e dalle perturbazioni gravitazionali esercitate dagli altri corpi del sistema.

Tuttavia, le traiettorie delle comete sono influenzate anche da forze di tipo non-gravitazionali dovute alla emissione di gas e polveri dal nucleo.

Considerato che queste forze sono da tre a quattro ordini di grandezza più deboli delle forze gravitazionali, la loro rilevazione richiede delle precise misure astrometriche della posizione dell'oggetto in cielo fatte su un lungo arco di tempo. Ed è proprio questo che è successo nel caso di 1I/Oumuamua che è stato osservato dalla sua scoperta fino al 2 gennaio 2018.

L'ultimo strumento a riprenderlo è stato il telescopio spaziale Hubble, quando era ormai a magnitudine +27 ed a 2,9 UA dal Sole (ossia in piena Fascia Principale degli asteroidi). Con questi dati, costituiti da 414 misure astrometriche scalari, con un livello di significatività di ben 30 deviazioni standard, la presenza di accelerazioni non-gravitazionali nel moto di 1I/Oumuamua è stata definitivamente confermata: il corpo si sta allontanando dal Sole più velocemente di quanto previsto in base alla sola forza di gravità.

La traiettoria osservata di 1I/Oumuamua non può essere descritta semplicemente usando la gravità del Sole e le perturbazioni degli altri corpi del Sistema solare. Questa accelerazione non-gravitazionale a cui è soggetto 1I/Oumuamua è molto comune nelle comete, dove si parla di "effetto razzo" perché gas e polveri emesse dai nuclei cometari esercitano una forza sul corpo d'origine nella direzione opposta a quella di emissione che, di solito, è rivolta verso il Sole.

La forza non-gravitazionale per questo effetto può essere descritta con una semplice legge del tipo: $1/r^k$ con una corrispondenza ottima per valori di k che si aggirano tra 1 e 2, mentre r è la distanza dal sole.

L'accelerazione non-gravitazionale A invece è descritta con una legge del tipo:

$$A = (A_1, A_2, A_3) \cdot g(r) \quad (2.2)$$

dove A_1 è la componente del vettore accelerazione A nella direzione radiale,

A_2 rappresenta quella trasversale, ed infine A_3 è la componente normale secondo un sistema di riferimento eliocentrico. La quantità $g(r)$ è una funzione per rappresentare la dipendenza radiale della perdita di massa, normalizzata in modo tale che $g(1\text{UA}) = 1$. L'unica componente significativa dell'accelerazione non gravitazionale di 1I/Oumuamua era quella radiale A_1 , con un valore di circa $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-2}$ ad una distanza di $r=1.4 \text{ UA}$. L'entità dell'accelerazione misurata è risultata essere tra i tre e i quattro ordini di grandezza maggiore delle tipiche accelerazioni osservate nelle comete del Sistema solare.

In mancanza di attività di degassamento inizialmente si è tentato di spiegare questa forza non-gravitazionale mediante l'effetto Yarkovsky e la pressione di radiazione.

Questi ultimi due processi sono fondamentali nelle dinamiche degli asteroidi poiché, anche se la quantità di forza rilasciata è incredibilmente piccola, soprattutto considerando la massa complessiva degli asteroidi, applicandola per decine di milioni di anni l'effetto sull'orbita del corpo è immenso, tanto che alcuni corpi che oggi orbitano fra Marte e Giove potrebbero diventare asteroidi vicini alla Terra.

L'effetto Yarkovsky è la variazione dell'orbita di un corpo del Sistema solare, dovuto alla combinazione dell'illuminazione da parte del Sole e della rotazione del corpo su sé stesso. Il fenomeno si basa sul fatto che un corpo, quando disperde calore nello spazio, riceve una spinta pari alla quantità di moto della radiazione emessa. L'effetto Yarkovsky fu previsto dall'omonimo scienziato polacco attorno al 1900, è stato misurato per la prima volta nel

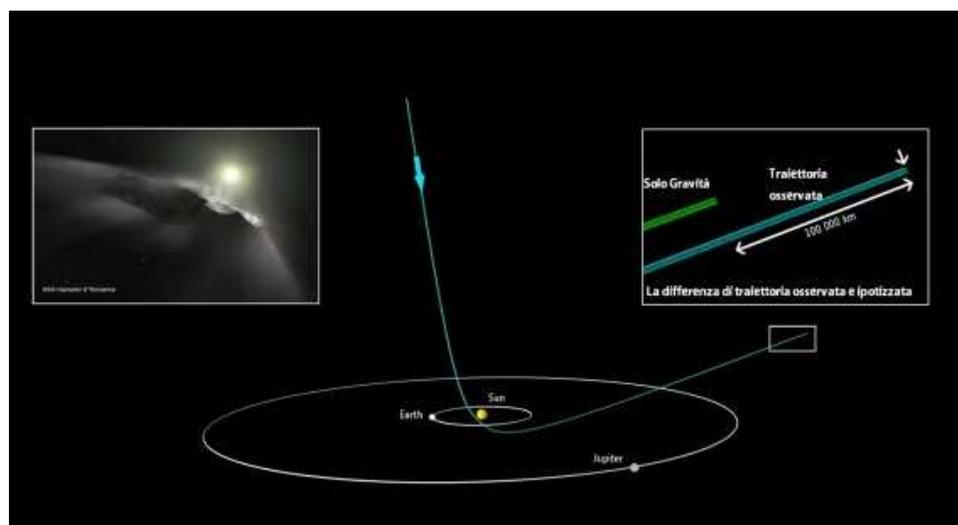


Figura 2.3: La traiettoria di Oumuamua: in verde e in azzurro, nel riquadro, la discrepanza tra la traiettoria osservata e quella che l'oggetto dovrebbe avere se fosse influenzato solo dalla forza di gravità.

2003, effettuando osservazioni radar sull'asteroide 6489 Golevka, un corpo asteroidale con diametro di circa 500 metri avente un peso di circa 200 milioni di tonnellate.

L'asteroide è stato osservato ripetutamente con la massima accuratezza possibile utilizzando il grande radiotelescopio di Arecibo a Puerto Rico e, grazie alla precisione delle misure e alla conoscenza esatta dei suoi parametri orbitali, è stato possibile valutare in 15 chilometri lo spostamento subito dall'asteroide fra il 1991 e il 2003 a causa dell'effetto Yarkovsky. La formula matematica che descrive la forza dovuta a questo effetto è la seguente:

$$F_Y = \frac{8\pi}{3c} s^2 \sigma T^4 \frac{\Delta T}{T} \cos\zeta \quad (2.3)$$

dove s è il raggio fisico del meteoroide, c è la velocità della luce, σ la costante di Stefan-Boltzmann, T la temperatura media, ΔT la differenza di temperatura tra le due facce del meteoroide e ζ l'angolo tra l'asse di rotazione e la direzione normale all'orbita.

La pressione di radiazione invece è dovuta al fatto che le onde elettromagnetiche, oltre che trasportare energia trasportano anche quantità di moto, secondo la formula:

$$U = \frac{I}{c} \quad (2.4)$$

dove I è l'intensità di radiazione, mentre c è la velocità della luce nel vuoto. Affinché 1I/Oumuamua fosse suscettibile all'azione di queste forze non-gravitazionali avrebbe dovuto però avere delle caratteristiche davvero insolite. Il primo requisito sarebbe quello di considerare il corpo avente una densità di circa 10^{-5} g cm⁻³ (circa 100 volte inferiore a quella dell'aria). Questo valore fornirebbe il rapporto superficie-massa richiesto per tenere conto dell'accelerazione osservata di 1I/Oumuamua.

Una struttura di questo tipo potrebbe anche aiutare a spiegare la sua forma insolita, tuttavia, il solido con la densità più bassa conosciuta è l'aerogel di grafene (10 volte meno denso dell'aria) ed è prodotto sinteticamente. Pertanto, non è chiaro come una struttura di questo tipo possa essere prodotta naturalmente.

2.3 Origini di 1I/Oumuamua

In un recente studio si è dimostrato come in un disco protostellare, i movimenti relativi delle particelle di polvere siano piccoli e quindi le collisioni siano lievi. Le simulazioni numeriche che studiano la crescita planetesimale attraverso collisioni di polvere in un disco protoplanetario mostrano che oltre le linee glaciali, se le minuscole particelle di polvere sono ricoperte di ghiaccio e hanno una dimensione di circa $0,1 \mu\text{m}$, gli aggregati che si formano avranno densità sempre più piccole man mano che crescono.

Ciò si verifica perché nelle prime fasi, quando le particelle sono piccole e fortemente accoppiate al gas, le velocità relative degli aggregati in collisione sono basse. Pertanto, quest'ultime non sono abbastanza energetiche per ristrutturare gli aggregati portando ad un rapido aumento della porosità man mano che l'aggregato cresce. Mentre gli aggregati diventano più grandi, si verifica la compressione collisionale che, tuttavia, è inefficiente e la porosità dell'aggregato in crescita continua ad aumentare. Questo aumento si verifica perché la maggior parte dell'energia di collisione viene spesa per comprimere i nuovi vuoti che vengono creati quando due aggregati entrano in collisione e si attaccano l'uno all'altro, piuttosto che comprimere i vuoti che erano già presenti negli aggregati in collisione.

Ciò che questi studi mostrano è che a circa 100 metri, all'incirca le dimensioni di 1I/Oumuamua, i planetesimi possono ottenere densità ultra-basse paragonabili a quelle che sarebbero necessarie per 1I/Oumuamua per essere "spinto" dalla pressione di radiazione. È stato quindi suggerito che quest'ultimo possa essere uno di questi prodotti intermedi del processo di formazione dei pianeti.

Se questa fosse la sua origine, sarebbe straordinariamente interessante perché si sa molto poco di questi prodotti precoci della formazione planetaria. In particolare, lo stadio intermedio, in cui particelle dell'ordine del centimetro crescono in planetesimi di dimensioni di chilometri, non è ben compreso perché quel processo dovrebbe essere teoricamente molto inefficiente.

Sono stati proposti diversi meccanismi per aiutare a superare questa "barriera del metro" e uno di questi è la presenza di planetesimi di porosità molto elevata. La bassa densità potrebbe favorire il processo di crescita perché la sezione trasversale più grande consentirebbe una vita più lunga contro l'effetto della deriva radiale nelle regioni interne del disco protoplanetario. Ciò faciliterebbe la crescita e renderebbe gli aggregati in collisione meno suscettibili alla frammentazione.

Un'altra teoria che potrebbe spiegare l'origine di 1I/Oumuamua è che quest'ultimo faccia parte di una classe relativamente nuova di oggetti del Sistema solare, ossia le comete oscure.

Al momento della scoperta di 1I/Oumuamua, non erano noti oggetti asteroidali che mostrassero accelerazioni non-gravitazionali senza emissione di polvere; pertanto, la loro scoperta su Oumuamua aveva destato un certo scalpore; tuttavia, successivamente è stata scoperta una nuova popolazione di asteroidi inattivi che mostrano parametri orbitali simili a 1I/Oumuamua e analogamente sono privi di chioma di polvere.

In particolare, sono stati riportati rilevamenti statisticamente significativi di accelerazioni non-gravitazionali non radiali in un campione di NEO fotometricamente inattivi. Gli oggetti con queste caratteristiche dedotte dai dati astrometrici sono 2003 RM, 1998 KY₂₆, 2005 VL₁, 2016 NJ₃₃, 2010 VL₆₅, 2006 RH₁₂₀ e 2010 RF₁₂. Tutte le accelerazioni non-gravitazionali di queste comete oscure non sono coerenti con l'essere causate dalla pressione

Tabella 2.2: Parametri orbitali di alcuni corpi del Sistema solare che presentano forti somiglianze con il comportamento anomalo di 1I/Oumuamua

Oggetto	a [UA]	e	i [°]	q [UA]	H [mag]	r_n [m]	P_{Rot} [h]
2003 RM	2.92	0.60	10.86	1.17	19.80	230	
1998 KY ₂₆	1.23	0.20	1.48	0.98	25.60	15	0.178
2005 VL ₁	0.89	0.23	0.25	0.69	27.45	11	
2006 RH ₁₂₀	1.00	0.04	0.31	0.96	29.50	2-7	0.046
2010 VL ₆₅	1.07	0.14	4.41	0.91	29.22	3	
2010 RF ₁₂	1.06	0.19	0.88	0.86	28.42	4	
2016 NJ ₃₃	1.31	0.21	6.64	1.04	25.49	16	0.41-1.99

Oggetto	A_1 [10^{-10} UA g ⁻²]	A_2 [10^{-10} UA g ⁻²]	A_3 [10^{-10} UA g ⁻²]
2003 RM	-1.045 ± 1.217	0.0215 ± 0.0004	0.0156 ± 0.0543
1998 KY ₂₆	1.73 ± 0.91	-0.00126 ± 0.00061	0.320 ± 0.115
2005 VL ₁	-6.66 ± 8.02	-0.00711 ± 0.00592	-0.240 ± 0.041
2006 RH ₁₂₀	1.38 ± 0.08	-0.507 ± 0.0637	-0.130 ± 0.032
2010 VL ₆₅	6.57 ± 13.0	-0.00146 ± 0.00534	-0.913 ± 0.130
2010 RF ₁₂	0.488 ± 0.597	-0.00136 ± 0.00286	-0.168 ± 0.021
2016 NJ ₃₃	9.28 ± 2.96	0.00566 ± 0.00193	0.848 ± 0.163

di radiazione o dall'effetto Yarkovsky.

Pertanto, questi corpi potrebbero essere oggetti analoghi a 1I/Oumuamua nel Sistema solare, in quanto hanno sperimentato accelerazioni non-gravitazionali e nessuna (o bassi livelli di) chioma di polvere. La mancanza di coma è stata attribuita a bassi livelli di degassamento e presumibilmente ad una carenza di materiale superficiale.

Sebbene 1I/Oumuamua sia ormai scomparso da tempo, lo studio di queste comete oscure potrebbe rivelare processi fisici simili che possono produrre degassamento e accelerazioni non-gravitazionali senza una significativa produzione di polvere.

Intorno all'anno 2030 la missione JAXA Hayabusa 2 si incontrerà con l'asteroide 1998 KY₂₆ e per mezzo degli strumenti a bordo potrà misurare la produzione di elementi volatili e di polvere. In questo modo, la natura di questi oggetti dovrebbe essere definitivamente identificata nel prossimo futuro.

Capitolo 3

2I/Borisov

A differenza di 1I/Oumuamua, che presentava caratteristiche proprie sia di asteroidi che di comete, 2I/Borisov mostrava una distinta chioma di polvere e gas ed era inequivocabilmente una cometa.

Si è visto quasi subito come la sua orbita sia stata fortemente iperbolica, con eccentricità $e = 3.358$, il valore ad oggi più alto mai misurato per un qualsiasi corpo del Sistema solare, di conseguenza l'origine interstellare di 2I non è mai stata in dubbio. La cometa inoltre presentava un valore di luminosità in magnitudini molto più alto di quello di 1I/Oumuamua, ossia 15.6. Questo dato, unito anche al fatto che è stato visibile per un periodo di tempo molto più lungo di 1I (circa 10 mesi contro i 3 di 1I), ha permesso di identificarne con precisione i parametri orbitali. Possedeva una velocità di fuga $v_\infty = 32.304 \pm 0.001$ km/s, un semiasse maggiore di $a = 0.850$ UA, inclinazione $i = 44.0^\circ$ e un perielio di $q = 2.009$ UA.

Le immagini ottenute con HST (Hubble Space Telescope) hanno fornito prove dirette per la misurazione del nucleo della cometa, ossia tra i 200 e i 500 metri. Questo dato è stato supportato anche dai limiti ottenuti da terra attraverso imaging a infrarossi.

Il limite superiore è stato derivato dalla modellazione del profilo di luminosità della chioma, mentre il limite inferiore è stato derivato dall'accelerazione non-gravitazionale misurata assumendo una densità apparente rappresentativa delle comete per evitare rotture dovuta a forze di degassamento. Questo valore di misura è più in linea con le comete del Sistema solare, e fornisce un netto contrasto con la dimensione molto più piccola dedotta per 1I/Oumuamua.

Le prime osservazioni spettrali, ottenute mediante il Gran Telescopio Canarias (GTC) da 10.4 metri, hanno rivelato che i colori misurati di 2I/Borisov, erano rappresentativi del colore della polvere espulsa che domina la maggior parte delle immagini ed era arrossata rispetto allo spettro del Sole, similmente ad 1I/Oumuamua. I valori sono stati inizialmente $g'-r' = 0.63 \pm 0.03$, poi successivamente sono stati rimisurati e si è ottenuto $g'-r' = 0.68 \pm 0.04$



Figura 3.1: Il secondo oggetto interstellare scoperto, 2I/Borisov. L'immagine è stata scattata con HST il 12 ottobre 2019 e, come si può ben notare, mostra una chiara coda cometaria.

e $i-r' = 0.23 \pm 0.03$.

Con 10 mesi di dati posizionali astrometrici, era evidente come anche 2I/Borisov mostrasse un'accelerazione non-gravitazionale. Analogamente a 1I/Oumuamua, la componente dominante di quest'ultima era in direzione radiale, ossia la componente A_1 . I valori che sono stati ottenuti risultano in $A_1 = (7.1 \pm 0.8) \cdot 10^8 \text{ UA g}^{-2}$, $A_2 = (-1.4 \pm 0.3) \cdot 10^8 \text{ UA g}^{-2}$, $A_3 = (0.68 \pm 0.04) \cdot 10^8 \text{ UA g}^{-2}$, tuttavia, l'accelerazione non gravitazionale di 2I/ Borisov è stata accompagnata da perdita di massa visibile e continua, pertanto la causa non è misteriosa.

3.1 Proprietà della chioma

In netto contrasto con 1I/Oumuamua, 2I ha mostrato (e, in effetti, è stato scoperto a causa di) un'evidente attività cometaria sotto forma di un'estesa chioma di polvere. I modelli di dinamica degli elementi volatili riproducono la morfologia che cambia lentamente della cometa e mostrano che la chioma è dominata da particelle sub-millimetriche e più grandi. I tassi di produzione stimati dai dati di imaging variano da $\dot{M} = 2 \text{ kg s}^{-1}$ a $\dot{M} = 35 \text{ kg s}^{-1}$. I tassi di produzione spettroscopici meno dipendenti dai modelli davano invece tassi di emissione compresi tra $\dot{M} = 20 \text{ kg s}^{-1}$ e $\dot{M} = 40 \text{ kg s}^{-1}$.

La presenza di conglomerati di dimensioni submillimetriche composte da particelle magnesio-ferrose è stata dedotta da osservazioni fotometriche per

Tabella 3.1: Tassi di produzione delle molecole H₂O, CO e OH misurati nella chioma di 2I/Borisov. r_H è la distanza eliocentrica al momento dell'osservazione.

Data	r_H [UA]	$Q(\text{H}_2\text{O}) \cdot 10^{26}$ [molecole s ⁻¹]	$Q(\text{CO}) \cdot 10^{26}$ [molecole s ⁻¹]	$Q(\text{OH}) \cdot 10^{26}$ [molecole s ⁻¹]
27/09/19	2.56	< 8.2		
02/10/19	2.50			< 0.2
11/10/19	2.38	6.3 ± 1.5		
13/10/19	2.36			< 0.2
01/11/19	2.17	7.0 ± 1.5		
01/12/19	2.01	10.7 ± 1.2		
03/12/19	2.01		3.3 ± 0.8	
11/12/19	2.01		7.5 ± 2.3	
15-16/12/19	2.02		4.4 ± 0.7	
19-22/12/19	2.03	4.9 ± 0.9	6.4 ± 1.4	
21/12/19	2.03	4.9 ± 0.9		
30/12/19	2.07		10.7 ± 6.4	
13/01/20	2.16	< 5.6	8.7 ± 3.1	
14/01/20	2.17	< 6.2		
17/02/20	2.54	< 2.3		

circa 2 mesi prima del perielio. Le misurazioni polarimetriche dell'oggetto ottenute dal VLT (Very Large Telescope) dell'ESA hanno mostrato inaspettatamente che la polvere nel flusso cometario mostrava un alto livello di polarizzazione rispetto ai livelli osservati nella polvere prodotta nelle tipiche comete del Sistema solare.

Questa polarizzazione è risultata essere coerente con un'alta frazione di aggregati frattali grezzi (circa 80%) e una bassa di detriti agglomerati (il restante 20%); questi dati indicano che 2I/Borisov possa essere in gran parte composta da particelle di polvere cosmica incontaminate.

L'orbita e la scoperta di 2I/Borisov hanno consentito di ottenere per diversi mesi misurazioni dettagliate della sua composizione. Sebbene l'oggetto fosse definitivamente una cometa, gli elementi di cui era costituita erano diversi da quelli tipicamente osservati negli altri corpi della stessa tipologia nel Sistema solare. Le misurazioni iniziali dell'oggetto hanno mostrato che l'H₂O era attivo già a 6 UA, mentre successive osservazioni hanno rivelato specie portatrici di carbonio e azoto nella chioma.

L'emissione nel vicino ultravioletto di CN insieme ad un limite superiore all'abbondanza di C₂, sono stati misurati il giorno 20 settembre 2019, basati su osservazioni con il telescopio William Herschel di 4.2 metri e lo spettrografo ISIS alla Palma. Le misurazioni della produzione di CN e C₂ sono state riportate anche utilizzando il telescopio Bok da 2.3 metri al Kitt Peak National Observatory in Arizona, poi mediante il telescopio MMT da 6.5 metri situato a Mount Hopkins ed infine attraverso il Large Binocular Telescope al DDT.

Simili rilevamenti spettroscopici e limiti superiori sono stati riportati uti-

Tabella 3.2: Tassi di produzione delle molecole CN, C₂ e C₃ misurati nella chioma di 2I/Borisov. r_H è la distanza eliocentrica al momento dell'osservazione.

Data	r_H [UA]	$Q(\text{CN}) \cdot 10^{24}$ [molecole s ⁻¹]	$Q(\text{C}_2) \cdot 10^{24}$ [molecole s ⁻¹]	$Q(\text{C}_3) \cdot 10^{24}$ [molecole s ⁻¹]
20/09/19	2.67	3.7 ± 0.4	< 4	
20/09/19	2.67	< 5	< 8	
01/10/19	2.50	1.1 ± 2.0	< 2.5	
01/10/19	2.51	1.8 ± 0.1	< 0.9	< 0.3
02/10/19	2.50	1.9 ± 0.1	< 0.6	< 0.2
09/10/19	2.41	1.59 ± 0.09	< 0.44	
10/10/19	2.39	1.69 ± 0.04	< 0.162	
13/10/19	2.36	2.1 ± 0.1	< 0.6	< 0.3
18/10/19	2.31	1.9 ± 0.6		
20/10/19	2.29	1.6 ± 0.5		
26/10/19	2.23	1.9 ± 0.3		
31/10/19	2.18	2.0 ± 0.2		
04/11/19	2.15	2.4 ± 0.2	0.55 ± 0.04	0.03 ± 0.01
10/11/19	2.12	1.9 ± 0.5		
14/11/19	2.09	1.8 ± 0.2	1.1	
17/11/19	2.08	1.9 ± 0.5		
25/11/19	2.04	1.6 ± 0.5		
26/11/19	2.04	1.8 ± 0.2		
26/11/19	2.04	1.5 ± 0.5	1.1	
30/11/19	2.01	3.36 ± 0.25	1.82 ± 0.6	0.197 ± 0.052
22/12/19	2.03	6.68 ± 0.27	2.3 ± 0.82	0.714 ± 0.074

lizzando i dati del telescopio Isaac Newton da 2.5 metri, nell'intervallo di tempo tra il 30 settembre 2019 e il 13 ottobre 2019. Sono stati segnalati rilevamenti di C₂ e di CN utilizzando i dati del telescopio Hiltner da 2.4 metri dell'osservatorio MDM e dell'Ohio State Multi-Object Spectrograph dal 31 ottobre 2019 al 4 novembre 2019. Ulteriori osservazioni sono state presentate utilizzando il Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) di 8.2 metri del Very Large Telescope (VLT) e del telescopi TRAPPIST da 0.6 metri alla Silla.

I tassi di produzione e i limiti superiori di H₂O, invece, sono stati misurati lungo tutta la traiettoria. Un tasso di produzione di $Q(\text{H}_2\text{O}) = 6.3 \pm 1.5 \cdot 10^{26}$ molecole s⁻¹ è stato derivato sulla base di osservazioni con lo strumento ARCES presso l'Osservatorio di Apache Point, il giorno 11 ottobre 2019, mentre il Telescopio himalayano Chandra di 2 metri situato presso l'Indian Astronomical Observatory, Hanle (HCT) e il Mount Abu Infrared Observatory (MIRO) hanno riportato osservazioni effettuate dal 30 novembre 2019 al 22 dicembre 2019 che mostrano velocità di produzione di $Q(\text{C}_2)/Q(\text{CN}) = 0.54 \pm 0.18$ e $Q(\text{C}_2)/Q(\text{CN}) = 0.34 \pm 0.12$ rispettivamente prima e dopo il perielio.

Mentre queste osservazioni discusse in precedenza erano in linea con le composizioni tipicamente osservate nelle comete del Sistema solare, le osservazioni successive al perielio hanno dimostrato che l'oggetto un'alta concen-

trazione di CO ipervolatile. Le immagini ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), ottenute tra il 15 e il 16 dicembre 2019, hanno rivelato la presenza di HCN e CO in grande abbondanza rispetto a H₂O.

Allo stesso modo, il Cosmic Origins Spectrograph (COS) sull'HST ha riportato osservazioni tra l'11 dicembre 2019 e il 13 gennaio 2020 che hanno rivelato un'elevata velocità di produzione della CO rispetto all'H₂O. Ulteriori misurazioni hanno scoperto che il rapporto di miscelazione CO/H₂O cambiava drasticamente tra prima e dopo perielio.

Infine lo spettrografo X-shooter al VLT ha rilevato del vapore di nichel atomico nella chioma di 2I/Borisov a 2.322 UA il 28, 30 e 31 gennaio 2020, quando l'oggetto era ad una temperatura di equilibrio di circa 180 K.

Il vapore atomico di nichel era già stato rilevato in precedenza in alcune comete del Sistema solare, soprattutto in quelle che transitano molto vicine al Sole, come nel caso del corpo C/1965 S1 (Ikeya-Seki). Tuttavia, questa emissione viene tipicamente osservata a temperature ben più calde (circa 700 K) ed è attribuita alla sublimazione del metallo arricchito da granelli di polvere. Successivamente si è scoperto che, nel caso di 2I/Borisov, l'emissione di vapore era dovuta alla fotodissociazione di una molecola contenente nichel a vita breve.

3.2 2I/Borisov in rapporto alle comete del Sistema solare

La composizione di 2I/Borisov era anomala rispetto alle comete tipicamente osservate nel Sistema solare, soprattutto a causa dell'elevata abbondanza di CO ipervolatile. Osservazioni contemporanee sensibili sia a H₂O che CO hanno rivelato un rapporto di produzione di $Q(\text{CO})/Q(\text{H}_2\text{O}) = 1$. È importante notare che questo tasso di produzione è stato calcolato solo quando sono state ottenute misurazioni quasi contemporanee di entrambe le specie chimiche.

Le comete sono composte principalmente di H₂O, infatti il valore medio di questo rapporto si aggira intorno al 4%, non è però una regola generale, in quanto può assumere un range estremamente ampio di valori.

Questo dato può essere interpretato efficacemente facendo risalire l'origine di 2I/Borisov ad un ambiente ricco di carbonio, per esempio attorno ad una stella di classe M, poiché le condizioni in un tale sistema porterebbero a un limite delle nevi di CO più vicino alla stella.

È interessante notare come l'abbondanza di elementi ipervolatili residui può essere indicativo anche dei tempi dell'espulsione di 2I/Borisov dal suo sistema d'origine. Anche se si fosse formato oltre il limite delle nevi di CO e vi fosse rimasto, il riscaldamento prolungato dovuto alla radiazione stellare avrebbe rimosso gli ipervolatili anche a grandi distanze se esposto per centinaia di milioni di anni. Pertanto, si è sostenuto che l'oggetto deve essere

stato espulso entro i 20 milioni di anni dalla formazione nel suo sistema d'origine.

Un interessante oggetto di confronto è C/2016 R2, un LPC (long-period comet) con eccentricità molto elevata che presenta un rapporto di produzione di $Q(\text{CO})/Q(\text{H}_2\text{O}) = 100$.

È stato suggerito che anche C/2016 R2 sia di origine interstellare a causa della sua composizione simile a quella di 2I. Pur non essendo un analogo diretto di 2I/Borisov, è una delle poche comete del Sistema solare arricchite in elementi ipervolatili e, con un valore così alto, è certamente il caso più estremo.

Altre comete appartenenti al Sistema solare rilevanti sono C/2009 P1 Garradd, C/2010 G2 Hill e C/2006 W3 Christensen che presentano tutte un'elevata abbondanza di CO rispetto all' H_2O . Infine anche la cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) aveva un rapporto di $Q(\text{CO})/Q(\text{H}_2\text{O}) > 12$, come anche il centauro 29P/SW1, che mostrava un valore di circa 10.

Tuttavia, avendo ottenuto questi dati ad una distanza di 6 UA dal perielio, le composizioni misurate non sono necessariamente rappresentative della loro reale composizione, poichè l' H_2O tipicamente non è attiva a così grande distanza.

In conclusione 2I/Borisov ha esibito un forte evento luminoso e la successiva rottura nella primavera del 2020. Le osservazioni sono state effettuate mediante l'HST verso la fine di marzo, dove il nucleo aveva sviluppato una forma bilobata.

L'evoluzione della morfologia della chioma di 2I/Borisov nelle immagini è stata interpretata come dovuta agli effetti stagionali. In particolare, i cambiamenti nei livelli di attività e la successiva rottura potrebbero essere spiegati dalle regioni nell'emisfero settentrionale del nucleo, che sono rimaste esposte al Sole per la prima volta.

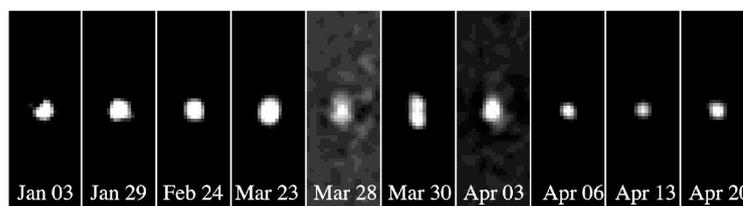


Figura 3.2: Immagini di 2I/Borisov (in cui la chioma è stata eliminata) ottenute dal telescopio spaziale Hubble, che mostrano l'aspetto del nucleo diviso il 30 marzo 2019. Ogni pannello mostra una regione larga 0,44 pollici corrispondente a circa 800 km alla distanza della cometa.

Capitolo 4

Prospettive future

C'è stato un notevole interesse nell'identificare le prospettive future per il rilevamento e la caratterizzazione degli oggetti interstellari.

La scoperta di 1I/Oumuamua, se rappresentativa di una classe di corpi distribuita isotropicamente, potrebbe implicare l'esistenza di una popolazione galattica di oggetti simili con densità numerica spaziale di circa 0.1 UA^{-3} , il che equivarrebbe ad un numero di corpi compreso tra 10^{14} e 10^{15} per stella della galassia.

È possibile, inoltre, che alcuni oggetti interstellari siano stati rilevati nel Sistema solare ma siano passati inosservati nei dati esistenti. Infatti, sebbene la condizione $e > 1$ sia necessaria per l'identificazione del materiale interstellare, da sola non è anche sufficiente, poiché le perturbazioni planetarie possono generare traiettorie iperboliche, sebbene con velocità in eccesso di soli 0.1 km s^{-1} . Pertanto, una ricerca sistematica di tali oggetti nei dati d'archivio sarebbe un prezioso primo passo verso il miglioramento delle stime della popolazione interessata, anche prima dell'avvento di nuovi e potenti telescopi per l'osservazione del cielo.

Si prevede che molti oggetti interstellari saranno trovati in futuro come prodotti di indagini a tutto cielo sia pianificati che già operativi. In particolare, l'Osservatorio Vera C. Rubin, (precedentemente noto come Large Synoptic Survey Telescope o LSST) che dovrebbe entrare in funzione nel 2024, offrirà un sostanziale aumento della sensibilità agli oggetti transitori, mentre studierà il cielo notturno nell'emisfero australe con una cadenza vicina a quella notturna.

Lo studio più recente sulla distribuzione prevista di oggetti interstellari includeva un calcolo degli elementi orbitali e degli avvicinamenti alla Terra da parte di corpi interstellari che saranno rilevati attraverso l'LSST. In questa analisi sono stati incorporati anche una serie di criteri di rilevamento che richiedevano che l'angolo di elongazione e la fase fossero tali da permettere all'LSST di studiare tali oggetti. I risultati di questa simulazione mostrano che il telescopio dovrebbe rilevare circa 1 o 2 oggetti interstellari all'anno.

Tabella 4.1: La frequenza con cui gli oggetti interstellari sono rilevabili dall'LSST e raggiungibili con un intervallo di criteri ΔV . Questi calcoli presuppongono che ogni oggetto interstellare abbia la stessa magnitudine assoluta di 1I/Oumuamua.

Criterio	Percentuale	Tasso conservativo all'anno	Tasso ottimistico all'anno
$m \leq 24$	$\sim 7.0\%$	~ 2.3	~ 4.6
Rilevabile con LSST	$\sim 2.8\%$	~ 0.9	~ 1.9
Rilevabile, $\Delta V < 30$ km/s	$\sim 1.1\%$	~ 0.35	~ 0.7
Rilevabile, $\Delta V < 15$ km/s	$\sim 0.4\%$	~ 0.1	~ 0.3
Rilevabile, $\Delta V < 2$ km/s	0.002%	$\sim 7 \cdot 10^{-4}$	~ 0.001

Nello spazio invece, il prossimo telescopio NEO Surveyor, facente parte della missione NEO Surveillance, sarà costituito da uno specchio di 50 cm di diametro, e sarà situato all'interno dell'orbita terrestre in L1, dove fornirà rilevamenti a infrarossi (10 μm) di piccoli corpi fuori dall'orbita di Giove, con una sensibilità agli oggetti vicini alla Terra che rivaleggia con quella dell'LSST. Grazie alla sua posizione privilegiata, fornirà anche una maggiore copertura del cielo a piccoli angoli di elongazione (Sole-telescopio-oggetto), più di quanto sia possibile con un telescopio da terra. Ciò consentirà il rilevamento di oggetti a distanze eliocentriche $r_H < 1$ UA.

Recentemente, inoltre, l'Agenzia Spaziale Europea ha selezionato la missione Comet Interceptor per il lancio nel 2029. Questa sarà composta da tre diverse sezioni A, B1 e B2 che disporranno di una dotazione di camere e sensori differenziata, basata sull'eredità di precedenti missioni, da ExoMars Trace Gas Orbiter a Rosetta.

Il veicolo spaziale composito attenderà nel punto di Lagrange L2 un bersaglio adatto per un periodo di tempo compreso tra qualche mese e qualche anno, quindi viaggerà verso tale obiettivo e solo successivamente, poche settimane prima di intercettare la cometa, i tre moduli si separeranno. Ogni modulo sarà dotato di un carico scientifico complementare, fornendo diverse prospettive del nucleo della cometa e del suo ambiente di gas, polvere e plasma.

Tali misurazioni miglioreranno notevolmente le informazioni necessarie per comprendere la natura dinamica di una cometa incontaminata mentre interagisce con l'ambiente del vento solare.

Le precedenti missioni sulle comete, tra cui le pionieristiche sonde spaziali Giotto e Rosetta dell'ESA, hanno incontrato prevalentemente oggetti di breve periodo. Si tratta di comete con periodi orbitali inferiori ai 200 anni che si sono avvicinate molte volte al Sole lungo le loro orbite in tempi relativamente recenti e di conseguenza hanno subito cambiamenti significativi: la cometa di Rosetta, 67P/Churyumov-Gerasimenko orbita attorno al Sole

una volta ogni 6,5 anni mentre la cometa 1P/Halley, visitata da Giotto e da altri veicoli spaziali nel 1986, ritorna nei nostri cieli ogni 76 anni.

La missione Comet Interceptor sarà diversa, perché prenderà di mira una cometa che visita per la prima volta il Sistema solare interno, proveniente verosimilmente dalla vasta Nube di Oort che circonda i confini esterni del Sistema solare. In quanto tale, la cometa conterrà materiale che non ha subito molte modifiche dal tempo della formazione del Sole e dei pianeti. La missione offrirà quindi una nuova visione dell'evoluzione delle comete mentre migrano verso l'interno dalla periferia del Sistema solare.

Vi è infine anche la possibilità che la missione venga dirottata su un altro bersaglio, ossia un corpo di origine interstellare, nel caso in cui venga scoperto mentre la sonda è in attesa. Nonostante le possibilità piuttosto scarse che ciò avvenga non si può però escludere a priori, e offrirebbe l'opportunità ideale per esplorare come si formano ed evolvono asteroidi o comete in altri sistemi stellari.

Lo studio degli oggetti interstellari, ancora agli inizi, subirà una rivoluzione con le imminenti osservazioni terrestri e spaziali. Queste ultime non solo aiuteranno capire l'origine di questa nuova componente del mezzo interstellare ed i possibili indizi che questi corpi sveleranno sulla formazione dei pianeti, ma consentiranno anche la straordinaria possibilità di studiare a distanza ravvicinata un frammento di un altro sistema planetario.

Bibliografia

- [Dorofeeva et al.(2023)] Dorofeeva, V. A., Borisov, G. V., & Shustov, B. M. 2023, *Solar System Research*, 57, 76. doi:10.1134/S0038094623010021
- [Jewitt & Seligman(2022)] Jewitt, D. & Seligman, D. Z. 2022, arXiv:2209.08182. doi:10.48550/arXiv.2209.08182
- [López Llobet & Hein(2022)] López Llobet, L. & Hein, A. M. 2022, arXiv:2209.01392. doi:10.48550/arXiv.2209.01392
- [Masiero(2017)] Masiero, J. 2017, arXiv:1710.09977. doi:10.48550/arXiv.1710.09977
- [Micheli et al.(2018)] Micheli, M., Farnocchia, D., Meech, K. J., et al. 2018, *Nature Astronomy*, 559, 223. doi:10.1038/s41586-018-0254-4
- [Moro-Martín(2022)] Moro-Martín, A. 2022, arXiv:2205.04277. doi:10.48550/arXiv.2205.04277
- [Seligman & Moro-Martín(2023)] Seligman, D. Z. & Moro-Martín, A. 2023, arXiv:2304.00568. doi:10.48550/arXiv.2304.00568
- [Siraj & Loeb(2021)] Siraj, A. & Loeb, A. 2021, *MNRAS*, 507, L16. doi:10.1093/mnrasl/slab084
- [Siraj & Loeb(2022)] Siraj, A. & Loeb, A. 2022, *Astrobiology*, 22, 1459. doi:10.1089/ast.2021.0189
- [Siraj et al.(2023)] Siraj, A., Loeb, A., Moro-Martín, A., et al. 2023, *Journal of Astronomical Instrumentation*, 12, 2340001. doi:10.1142/S2251171723400019
- [Taylor et al.(2023)] Taylor, A., Seligman, D., MacAyeal, D., et al. 2023, *BAAS*.
- [Zhang & Lin(2020)] Zhang, Y. & Lin, D. N. C. 2020, *Nature Astronomy*, 4, 852. doi:10.1038/s41550-020-1065-8