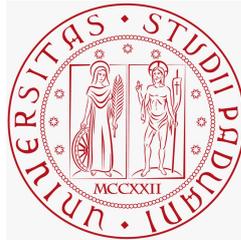


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
SCUOLA DI SCIENZE
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
"GALILEO GALILEI"



LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

Natura delle due comete interstellari 1I/'Oumuamua e 2I/Borisov

Origine, dinamica e studi sulla popolazione degli oggetti
interstellari

Relatore: Marzari Francesco

Laureando: Samuele Antico

Anno accademico 2019/2020

Abstract

Sfruttando modelli teorici e simulazioni di formazione dei dischi protoplanetari è possibile ottenere alcune stime sulla quantità di materiale roccioso e ghiacciato eiettato su orbite iperboliche rispetto alla propria stella, nello spazio interstellare. In questo modo, avendo una base di predizioni teoriche da cui partire, è possibile effettuare un confronto con le osservazioni dei cosiddetti oggetti interstellari (*interstellar objects*) e testare quindi la validità dei modelli di formazione attualmente elaborati. Tuttavia le stime teoriche forniscono valori della *densità di massa* di questi oggetti, mentre le osservazioni permettono di definirne la *densità numerica*. Per poter collegare queste due grandezze è necessario sapere in che modo sono distribuite le dimensioni degli oggetti interstellari, ovvero conoscerne la SFD (*Size Frequency Distribution*), funzione che può essere valutata empiricamente a partire da un campione sufficientemente rappresentativo di oggetti di cui siano note le dimensioni. Questo lavoro di tesi si propone di fare il punto sui metodi utilizzati per arrivare alle suddette stime teoriche e per effettuare un efficace confronto coi dati osservativi, delineando l'importanza del futuro delle osservazioni di questo tipo e fornendo una spiegazione sull'origine e sulla quantità di asteroidi e comete interstellari presenti. A tale scopo verranno riportati alcuni procedimenti e i risultati di numerosi studi effettuati nell'ambito.

introduzione

La presenza di asteroidi e comete vaganti nello spazio interstellare è stata predetta per via teorica decenni prima che venisse confermata l'iperbolicità dell'orbita, appena tre anni fa, del primo oggetto interstellare osservato. Tale presenza rappresentava semplicemente una delle conseguenze dei meccanismi che caratterizzavano i processi di formazione ed evoluzione dei dischi protoplanetari. Lo studio di questi oggetti rappresenta un'essenziale finestra di osservazione "da vicino" di materiale proveniente da sistemi solari diversi dal nostro: solo in tempi molto recenti la ricerca ha iniziato a focalizzarsi intensamente in quest'ambito, in seguito ai primi risultati concreti ottenuti dall'osservazione del primo asteroide e della prima cometa interstellari. Lo studio della loro dinamica e della loro origine permette inoltre di determinarne e comprenderne la natura, ed eventualmente il sistema di provenienza. Per questa serie di motivi è necessario definire efficaci metodi di approccio al problema, che permettano di sfruttare al meglio i dati osservativi e di effettuare un buon confronto con le predizioni teoriche, con l'obiettivo sia di testare e verificare gli attuali modelli sia di acquisire conoscenze più approfondite sul popolamento dello spazio interstellare da parte di oggetti di questo tipo.

Indice

1	Oggetti interstellari: stima teorica della densità di massa	9
1.1	Generalità	9
1.1.1	Dinamica	9
1.1.2	Origine	11
1.2	Stima della densità di massa dei planetesimi nello spazio interstellare	12
1.2.1	Popolazione stellare nel vicinato solare	13
1.2.2	Distribuzione dei giganti gassosi e ghiacciati tra le stelle	13
1.2.3	Massa in planetesimi eiettata dai sistemi planetari . . .	16
1.2.4	Contributo totale alla densità di massa	19
2	Dinamica dei due oggetti interstellari 1I/'Oumuamua e 2I/Borisov	21
2.1	1I/'Oumuamua	21
2.1.1	Dinamica	21
2.1.2	Cenni sugli aspetti fisici	23
2.2	2I/Borisov	24
2.2.1	Dinamica	24
2.2.2	Cenni sugli aspetti fisici	25
3	Confronto tra osservazioni e modelli teorici	29
3.1	Legame tra densità numerica e densità di massa: la SFD . . .	29
3.2	Stima della SFD	30
3.2.1	Il problema della mancanza di dati	30
3.2.2	Vincoli apportati dalle attuali osservazioni	30
3.3	Cenni sulle probabilità di osservazione	33
	Bibliografia	39

INDICE

Capitolo 1

Oggetti interstellari: stima teorica della densità di massa

Nella prima sezione di questa tesi verranno discusse brevemente dapprima alcune importanti generalità sugli aspetti dinamici degli oggetti interstellari (dalla denominazione inglese *interstellar objects*, altresì chiamati ISO, intesi come asteroidi o comete extrasolari, escludendo quindi dall'analisi oggetti sostanzialmente più massivi come i pianeti interstellari o le stelle stesse) e sulla loro origine, per arrivare poi a un'analisi più approfondita di come attraverso alcune simulazioni sia possibile spiegare e *quantificare* la presenza di questi oggetti nello spazio interstellare, seppur con un'elevata incertezza dovuta sostanzialmente all'estrema varietà dei fattori che possono contribuire a definire la loro origine. Il senso ultimo di questo sforzo è quello di confrontare le predizioni teoriche con le osservazioni con lo scopo di avere una stima sempre più precisa della densità di oggetti di questo tipo che popolano spazio interstellare e di porre vincoli sempre più limitanti alle attuali teorie di formazione dei dischi protoplanetari e ai meccanismi di eiezione di oggetti su orbite iperboliche da parte di questi.

1.1 Generalità

1.1.1 Dinamica

Gli oggetti interstellari di natura rocciosa e/o ghiacciata possono essere di varie tipologie: principalmente vengono classificati in asteroidi extrasolari, comete extrasolari e pianeti vagabondi (*rogue planets*). Essi vengono sostanzialmente *espulsi* dal proprio sistema solare e si ritrovano così a vagare nello

1.1. GENERALITÀ

spazio interstellare (si tratta in sostanza di oggetti non legati gravitazionalmente a una stella). Le categorie prese in esame in questa tesi saranno le prime due. Lo studio della dinamica di un oggetto che si trova all'interno del sistema solare consiste sostanzialmente nella determinazione dei cosiddetti *parametri orbitali*, essenziali a determinare univocamente l'orbita di un corpo in un sistema ideale rappresentato da questo e da un secondo corpo, in genere più massivo del primo (detto *gerarca*), ove entrambi seguono le leggi newtoniane del moto e la cui interazione è descritta dalla legge di gravitazione universale. I parametri orbitali sono i seguenti, ciascuno caratterizzato da una lettera greca o latina:

- Argomento del pericentro (ω);
- Inclinazione (i);
- Longitudine del nodo ascendente (Ω);
- Eccentricità (e);
- Semiasse maggiore (a) o eventualmente periodo orbitale (T);
- Anomalia media (M).

In particolare, per determinare l'appartenenza o meno al sistema solare di un determinato corpo è sufficiente conoscerne l'eccentricità e : essa definisce, intuitivamente, la *deviazione della forma dell'orbita da una circonferenza perfetta*, corrispondente a $e=0$. $0 < e < 1$ implica un'orbita *ellittica*, mentre $e=1$ determina un'orbita *parabolica*, e quindi aperta (orbita circolare e parabolica rappresentano ovviamente casi ideali). Quando l'eccentricità supera l'unità, viene definita un'**orbita iperbolica**: è questo il caso di reale interesse per lo studio di oggetti provenienti dal di fuori del sistema solare. Una volta constatato che l'eccentricità di un corpo è maggiore di 1, l'oggetto risulta certamente "slegato" gravitazionalmente dal sole, intendendo con questo che una volta raggiunto il perielio tale oggetto continuerà ad allontanarsi indefinitamente dalla nostra stella senza più attraversare fasi di avvicinamento dovute puramente all'attrazione gravitazionale solare. Un'eccentricità superiore all'unità non è tuttavia sufficiente a garantire la provenienza dallo spazio interstellare dell'oggetto in questione, in quanto un corpo sufficientemente massivo (e.g. il gigante gassoso Giove) potrebbe aver *perturbato la sua orbita* fino a renderla iperbolica¹, come dimostrato da alcune simulazioni: è necessario constatare attraverso determinate osservazioni che non vi siano state perturbazioni di questo genere (ad esempio osservando l'inclinazione dell'oggetto rispetto al piano di equilibrio del sistema solare, per la quale un valore elevato garantirebbe una certa improbabilità di eventuali interazioni).

Studi di questo genere hanno portato finora alla determinazione dell'orbita di *due* oggetti di accertata provenienza interstellare (un presunto asteroide e una cometa extrasolari)^{15,20} i cui aspetti dinamici verranno approfonditi nella seconda sezione della tesi.

1.1.2 Origine

Le teorie sviluppate per spiegare l'origine degli asteroidi e delle comete interstellari sono molteplici, ma le più accreditate consistono nel considerare tali oggetti come *planetesimi* (o frazioni di essi) originatisi in un disco protoplanetario dominato da gas, accumulatosi attorno a una protostella¹. Tali strutture risultano essere estremamente comuni in stelle molto giovani (<3Myr)²¹. È stato inoltre osservato un eccesso di intensità infrarossa in una frazione significativa (circa il 20%) di stelle aventi circa l'età del sole o poco più. Questo eccesso viene giustificato assumendo che vi sia una determinata quantità di polvere in continua collisione con planetesimi nelle zone più esterne del piano di equilibrio del sistema: si parla dei cosiddetti dischi di detriti (*debris disks*)⁶. In sostanza, si può concludere che vi siano un gran numero di stelle nel disco galattico presentanti un elevato numero di planetesimi in orbita nel loro piano di equilibrio che potrebbero potenzialmente essere *eiettati in orbite iperboliche* contribuendo a popolare lo spazio interstellare di tali oggetti. È opportuno inoltre osservare che l'origine di asteroidi e comete non è esattamente la stessa. Come è noto, la nube di Oort rappresenta per il sistema solare una sorta di "serbatoio" naturale di comete, e sembra non esserci motivo per non ritenere che anche per gli altri sistemi valga lo stesso. Gli asteroidi interstellari invece potrebbero essere stati eiettati anche da zone meno periferiche del proprio sistema, più vicine alla propria stella.

Esistono *svariati meccanismi* attraverso i quali i planetesimi possono essere eiettati in orbite iperboliche rispetto alla propria stella, in particolar modo nelle prime fasi di formazione del disco di detriti, e ciascuno di essi dipende da un'enorme quantità di fattori (ragion per cui uno studio teorico efficace può essere condotto soltanto con le dovute approssimazioni, e principalmente attraverso simulazioni). Un primo meccanismo, che le simulazioni affermerebbero essere tra i più efficienti, è rappresentato dall'interazione gravitazionale con altre stelle che dovessero avvicinarsi sufficientemente al sistema, fenomeno ricorrente nei cluster ricchi di gas e di stelle in formazione e che contribuisce a deformare il disco di detriti ed eventualmente a perturbare il materiale presente nelle zone più esterne. Il meccanismo che attualmente è ritenuto essere il più efficiente sulla base di quanto testimoniato dalle simulazioni consiste nella *perturbazione delle orbite dei planetesimi da parte di*

1.2. STIMA DELLA DENSITÀ DI MASSA DEI PLANETESIMI NELLO SPAZIO INTERSTELLARE

un corpo particolarmente massivo, come potrebbe essere un pianeta gigante gassoso o ghiacciato¹. Le simulazioni dimostrerebbero inoltre un forte aumento dell'efficacia di questo possibile meccanismo di eiezione in quei sistemi in cui i pianeti giganti stessi si trovano in uno stato dinamico instabile (moto caotico)². Le orbite dei planetesimi vengono perturbate quando essi si trovano in contatto ravvicinato coi pianeti giganti: a favorire tale avvicinamento vi è la migrazione planetaria, fenomeno estremamente frequente nei dischi in formazione, attraverso la quale il pianeta sembrerebbe entrare in contatto con gran parte dei detriti, planetesimi compresi. Si ritiene poi probabile che fenomeni di perdita di massa delle stelle che abbandonano la sequenza principale favoriscano la separazione dei planetesimi dal disco. Infine, alcune simulazioni dimostrano che nei dischi di detriti in formazione attorno a un *sistema binario* avvengono fenomeni di destabilizzazione per qualunque planetesimo che si venga a trovare a una distanza inferiore a una determinata *distanza critica* dalle due stelle, causandone una rapida eiezione²⁰.

1.2 Stima della densità di massa dei planetesimi nello spazio interstellare

La stima della quantità di planetesimi presenti nello spazio interstellare per via teorica rappresenta un problema estremamente complesso per via dell'*enorme varietà di fattori* da cui il processo di popolamento dipende. Basti pensare che la quantità di materiale roccioso e/o ghiacciato eiettato da un disco di detriti in formazione dipende fortemente dall'efficienza con la quale i vari metodi di eiezione citati in precedenza hanno luogo. Questa dipende a sua volta dalla tipologia di disco con cui abbiamo a che fare, dalla quantità di massa di gas e planetesimi presente, dalla massa della stella centrale, dall'entità delle interazioni col vicinato stellare ecc. Tutto questo implica che una stima accurata di questa importante quantità sia (per lo meno attualmente) sostanzialmente impossibile: tutto ciò che è possibile fare è assumere una considerevole quantità di approssimazioni e affidarsi alle più precise *simulazioni* di formazione dei dischi di detriti a disposizione. Verrà ottenuta così una stima inferiore della densità di massa in planetesimi presente nello spazio interstellare che, seppur caratterizzata da un'elevata incertezza, permetterà di avere un minimo di confronto con le osservazioni. Quest'ultimo argomento in particolare verrà approfondito nella terza sezione di questa tesi.

1.2.1 Popolazione stellare nel vicinato solare

La prima approssimazione consiste nel limitarsi al cosiddetto *vicinato solare*, una zona del disco galattico centrata sul Sole e avente convenzionalmente un raggio pari a circa 5.2 pc, distanza considerata sufficiente a rendere ben rappresentativo il campione di stelle compreso al suo interno³. Uno studio dettagliato in questo ambito riportato da P. Kroupa et al. (1993) ha dimostrato che la *funzione di massa iniziale*

$$\xi(m) \propto m^{-\alpha} \quad (1.1)$$

che descrive il *numero di stelle di massa m per pc^3* assume un indice di legge di potenza α per le stelle di massa minore del Sole $\alpha \approx 1.5$. Sapendo poi che la densità di massa in stelle di sequenza principale nel vicinato solare con masse comprese tra 0.08 e $100M_{\odot}$ è pari a $\rho_{star,matter} = 0.05 \pm 0.01 M_{\odot} pc^{-3}$, e che di queste le stelle aventi massa minore di una massa solare contribuiscono all'incirca per l'80% (incluso in queste stime anche i sistemi binari), si ottiene una stima *inferiore* per la densità numerica in stelle di ~ 0.2 **stelle per parsec cubico**³.

Ricordando che vogliamo solamente dare una stima del limite *inferiore* della densità di massa in planetesimi eiettati nello spazio interstellare, in seguito assumeremo che il vicinato solare sia *dominato da stelle di piccola massa* (classi *K* e *M*, e in una frazione $\sim 10\%$ da classi *F* e *G*) e considereremo solamente queste per analisi specifiche della quantità di massa espulsa dai sistemi in formazione.

1.2.2 Distribuzione dei giganti gassosi e ghiacciati tra le stelle

Uno o più pianeti per stella nella Via Lattea. Uno studio effettuato da A. Cassan et al. (2012)⁴ ha dimostrato, sfruttando l'effetto del *microlensing gravitazionale*, che nella Via Lattea esiste un numero di pianeti gravitazionalmente legati a stelle pari almeno al numero di stelle della Galassia stessa. Nella fattispecie sono stati analizzati alcuni dati relativi a sei anni di osservazioni (2002-2007) sulla ricerca di esopianeti sfruttando l'effetto del microlensing gravitazionale: trattasi di piccole variazioni della curva di luce che hanno luogo nel momento in cui l'esopianeta attraversa la linea di vista (in sostanza, "passa" tra noi e la stella osservata), causate dal suo campo gravitazionale. L'analisi in questione si basa per gran parte su considerazioni statistiche: è infatti impossibile osservare un fenomeno di microlensing gravitazionale per *ogni* stella, sia perché l'orbita dell'esopianeta deve "attraversare" la linea di vista (fenomeno piuttosto raro: si stima che meno di una stella

1.2. STIMA DELLA DENSITÀ DI MASSA DEI PLANETESIMI NELLO SPAZIO INTERSTELLARE

osservabile su un milione sia, in qualsiasi momento, oggetto di un effetto di microlensing), sia perché spesso la strumentazione attualmente utilizzata non raggiunge livelli di sensibilità sufficiente a individuare perturbazioni talvolta estremamente deboli. Per rendere efficienti le osservazioni vengono scansionate ampie aree di cielo tramite alcune survey come *Optical Gravitational Lensing Experiment* (OGLE) o *Microlensing Observations in Astrophysics* (MOA), dopodiché i candidati individuati diventano immediatamente oggetto di scrupolose osservazioni da parte di apposite reti di telescopi. È stato così selezionato un campione di dati il più possibile imperturbati (un solo evento di microlensing ben definito), attraverso il quale è stata determinata la *sensibilità della survey* a partire dall'*efficienza di osservazione (di un esopianeta)* $\varepsilon(\log a, \log M)$, definita come la probabilità che il segnale di un esopianeta osservabile compaia se la stella avesse un solo pianeta in orbita attorno a sé, con un determinato *semiasse maggiore* a e una determinata *massa* M . La *sensibilità della survey* $S(\log a, \log M)$ è stata ottenuta sommando le ε per ogni evento di microlensing osservato. Essa ha fornito il numero di esopianeti che la survey in questione ci si aspettava avrebbe individuato se tutte le stelle affette da microlensing avessero presentato esattamente un pianeta di massa M e semiasse maggiore a . A questo punto è stata calcolata la *funzione di massa planetaria* $f(\log a, \log M) = dN/(d \log a, d \log M)$, con N numero medio di esopianeti per stella, e dall'integrazione del suo prodotto con la S è stato ottenuto il numero di esopianeti attesi dalle osservazioni con la survey. Infine, attraverso ragionamenti statistici e teorici basati anche sui risultati di altri studi, è stata analizzata la dipendenza della f dal semiasse maggiore e dalla massa. Considerando solamente esopianeti in un *range di massa* $5M_{\oplus} - 10M_{jup}$ e di *distanza dalla propria stella* $0.5 - 10au$ sono state tratte da questi studi alcune importanti informazioni, come l'aumentare del numero di pianeti presenti per stella man mano che vengono considerate masse minori (tanto che quelli di piccola massa sono risultati essere estremamente comuni), ma soprattutto un *numero medio di esopianeti (generici, nei range di massa e semiasse maggiore considerati) per stella nella Via Lattea pari a* $1.6_{-0.89}^{+0.72}$. Trattandosi di una media non c'è motivo di pensare che ogni stella presenti effettivamente questo numero di pianeti, ma per i nostri scopi possiamo prendere in considerazione un limite inferiore, approssimato, di *un pianeta (generico) per ogni stella* nei dintorni del sistema solare⁴.

È necessario a questo punto tentare di quantificare la frequenza con la quale i pianeti giganti gassosi e ghiacciati si presentano nei sistemi caratterizzati da una stella di classe FGKM. È importante notare che l'efficienza nell'espellere materiale dai dischi nel caso di giganti gassosi e ghiacciati risulta differente: per questo motivo è opportuno differenziare i due contributi e sommarli

una volta completata l'analisi. La differenza sostanziale tra i giganti gassosi e ghiacciati non riguarda propriamente soltanto la composizione, ma anche *la massa* (generalmente i gassosi tendono a essere più massivi dei ghiacciati avendo una massa da una fino a qualche centinaio di volte maggiore nei casi più estremi, per quanto per entrambi venga usualmente definito un limite minimo di $10M_{\oplus}$): proprio per questo motivo l'efficienza nell'eiettare planetesimi su orbite iperboliche da parte dei giganti gassosi risulta mediamente maggiore, come vedremo.

Per rimarcare ulteriormente le numerose dipendenze di questa difficile analisi notiamo che anche la massa del singolo pianeta gigante, che può variare considerevolmente, definisce l'efficienza dei meccanismi di eiezione¹. Tuttavia la questione si complicherebbe molto, e anche in questo caso assumeremo il contributo medio per un generico pianeta gigante, senza entrare nei dettagli riguardo l'efficienza alle varie masse.

Per quanto riguarda i giganti gassosi, riprendiamo il risultato di uno studio eseguito da Cumming et al. (2008)⁹ che ha analizzato i dati di una campagna di osservazioni delle velocità radiali di un campione di circa 600 stelle FGKM durata 8 anni. È stato eseguito il fit di una funzione piuttosto semplice per la probabilità di avere un pianeta in una di queste stelle con massa $> 100M_{\oplus}$ e periodo $< 5.5yr$ avente la forma:

$$\frac{dN}{dlnM_p dlnP} \propto M_p^{\alpha} P^{\beta} \quad (1.2)$$

il quale ha fornito i valori $\alpha = -0.31 \pm 0.20$ e $\beta = 0.26 \pm 0.10$, e una normalizzazione tale per cui la probabilità che una stella FGKM possieda un pianeta avente $P < 5.5yr$ e $M_p = 0.3 - 10M_{jup}$ risulta essere $\sim 10, 5\%$.

Differenti studi hanno poi fornito alcuni importanti risultati riguardo la probabilità che una stella di tipo FGK possieda un pianeta di varie masse/raggi e periodi orbitali, riportati in *tabella 1*.

In particolare è possibile notare che per pianeti aventi massa $> 10M_{\oplus}$ la probabilità che essi siano presenti in una stella di tipo FGK risulta essere indicativamente dell'1%.

1.2. STIMA DELLA DENSITÀ DI MASSA DEI PLANETESIMI NELLO SPAZIO INTERSTELLARE

tabella 1 - statistiche pianeti attorno a stelle FGK. Winn, J. N. et al. (2015)⁷

Studio	Tecnica	Periodo	Dimensione	Probabilità [%]
Wright et al.(2012) ²²	Vel. radiali	< 10 d	> 30 M_{\oplus}	1.20 ± 0.38
Mayor et al.(2011) ⁵	Vel. radiali	< 11 d	> 50 M_{\oplus}	0.89 ± 0.36
Cumming et al.(2008)	Vel. radiali	< 5.2 yr	>100 M_{\oplus}	8.5 ± 1.3
		<100 d	>100 M_{\oplus}	2.4 ± 0.7
Howard et al.(2010) ²³	Velocità radiali	<50 d	3–10 M_{\oplus}	11.8 ^{+4.3} _{-3.5}
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	6.5 ^{+3.0} _{-2.3}
Mayor et al.(2011) ⁵	Velocità radiali	<50 d	3–10 M_{\oplus}	16.6 ± 4.4
		<50 d	10–30 M_{\oplus}	11.1 ± 2.4
		<10 yr	>50 M_{\oplus}	13.9 ± 1.7
Fressin et al.(2013) ²⁴	Transito	<10 d	6–22 R_{\oplus}	0.43 ± 0.05
		<85 d	0.8–1.25 R_{\oplus}	16.6 ± 3.6
		<85 d	2–4 R_{\oplus}	19.9 ± 1.2
		<85 d	1.25–22 R_{\oplus}	52.3 ± 4.2
Petigura et al.(2013) ²⁵	Transito	5–100 d	1–2 R_{\oplus}	26 ± 3
		5–100 d	8–16 R_{\oplus}	1.6 ± 0.4

A fronte delle considerazioni precedenti, possiamo quindi assumere per una stella di massa media nei dintorni del Sole una *probabilità che essa presenti un gigante gassoso* $\sim 1 - 10\%$.

Studi analoghi che sfruttano l'effetto del microlensing gravitazionale riportati da D. Suzuki et al. (2016)⁸ hanno concluso che la *probabilità che una stella presenti un gigante ghiacciato* è invece più elevata, aggirandosi intorno al 10 – 50%. Inoltre la dipendenza dalla massa della stella stessa sembrerebbe essere più debole rispetto ai giganti gassosi.

1.2.3 Massa in planetesimi eiettata dai sistemi planetari

La quantità di massa in planetesimi eiettata su orbite iperboliche da un sistema planetario a causa della perturbazione da parte dei giganti gassosi o ghiacciati presenti dipende da una serie di fattori, in particolar modo dalle specifiche dinamiche di ogni sistema e dalla stabilità/instabilità dei suddetti pianeti².

Per quanto riguarda i giganti gassosi, uno studio riportato da Sean N. Raymond et al. (2010)² ha messo in luce una serie di risultati utili alla nostra analisi. Sono state utilizzate diverse simulazioni per osservare gli effetti del planet-planet e planet-planetesimal scattering sui dischi protoplanetari, in particolare le Mixed1 e Mixed2. La prima tratta l'evoluzione di un tipico di-

sco di detriti in presenza di almeno un pianeta di massa compresa tra $1M_{sat}$ e $3M_{jup}$, mentre la seconda riduce la massa minima del pianeta a $10M_{\oplus}$.

Si è osservato che il disco di detriti, composto da gas, polveri e planetesimi in formazione, può avere un'importante influenza sull'evoluzione dinamica dei pianeti giganti presenti. Il disco tuttavia subisce a sua volta una sorta di reazione da parte dei pianeti, vedendo i propri planetesimi eiettati su orbite iperboliche o eventualmente fatti collidere coi pianeti stessi o con altri planetesimi.

L'interazione tra planetesimi e pianeti dipende in particolar modo *dall'orbita* di questi ultimi: un'orbita prettamente circolare permette un'interazione con solo una piccola porzione del disco, mentre un'orbita più eccentrica va a ricoprire una "fascia" più estesa, favorendo anche un aumento delle velocità di collisione, rendendo tutto il processo più efficace (eiezioni più frequenti). In *Figura 1.1* sono riportati i tempi scala per l'eiezione/collisione dei planetesimi per un gran numero di simulazioni Mixed1, in cui ogni curva corrisponde a una simulazione. Le simulazioni sono inoltre suddivise in *stabili*, *moderatamente stabili* e *instabili* (maggiori dettagli in descrizione). In particolar modo, è interessante notare che le simulazioni Mixed1 instabili eiettano o mandano in collisione la maggior parte dei planetesimi del disco in tempi scala pari a $10^5 - 10^6$ anni, mentre negli altri casi i tempi scala aumentano di due o tre ordini di grandezza, e i dischi non vengono privati completamente dei planetesimi. Infatti, nel caso *stabile* le simulazioni Mixed1 dimostrano che le interazioni tra pianeti e planetesimi diventano meno frequenti, e che i dischi di detriti *conservano* dal 50 al 75% del proprio materiale ghiacciato e roccioso.

A fronte dei risultati degli studi precedentemente citati e tenendo conto del fatto che stiamo assumendo che le stelle nel vicinato solare siano prevalentemente di piccola massa, delle quali la maggior parte sono stelle di tipo M ($\sim 80\%$) e le restanti di tipo FGK, considerando valori tipici per le masse dei dischi di detriti caratteristici di questo tipo di stelle è possibile assumere che *ogni sistema che presenti almeno un gigante gassoso eietti da 1 a 100 masse terrestri* nello spazio interstellare. L'elevata imprecisione del valore è dovuta al fatto che l'efficienza dell'eiezione di ogni sistema considerato varia considerevolmente con le sue caratteristiche, quali possono essere la massa iniziale della nube di gas da cui si è formato, la quantità e la massa dei giganti gassosi presenti, l'evoluzione della sua dinamica ecc.

Per quanto riguarda invece i *giganti ghiacciati*, sappiamo che essi contribuiscono a eiettare materiale del disco di appartenenza nello spazio interstellare sia durante che dopo la loro formazione¹⁹. I processi di interazione coi plane-

1.2. STIMA DELLA DENSITÀ DI MASSA DEI PLANETESIMI NELLO SPAZIO INTERSTELLARE

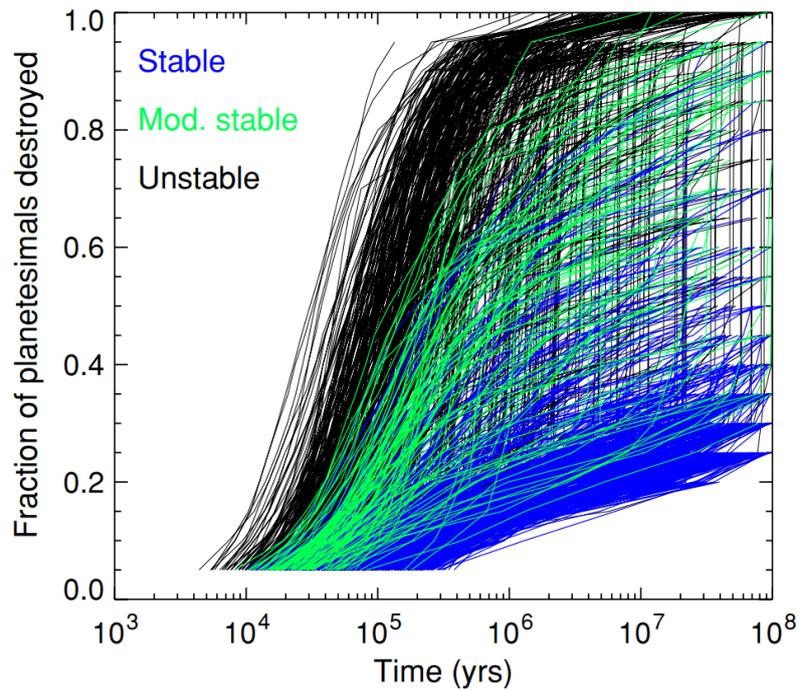


Figura 1.1: **Tempi scala per le eiezioni/collisioni per le simulazioni Mixed1.** Le linee nere corrispondono a simulazioni instabili, che presentano almeno un incontro ravvicinato tra pianeti. Le linee verdi rappresentano le simulazioni moderatamente stabili, in cui non si ha alcun incontro ravvicinato tra pianeti ma le eccentricità di questi evolvono oltre il valore di 0.025. Le linee blu corrispondono invece al caso stabile, per cui non si hanno incontri e le eccentricità mantengono valori bassi. *Sean N. Raymond et al. (2010).*

tesimi sono analoghi a quelli precedentemente descritti per i giganti gassosi, con due sostanziali differenze: la massa dei giganti ghiacciati, che risulta essere mediamente ben minore di quella dei giganti gassosi, e la frequenza con la quale essi si presentano. Per lo studio della loro dinamica e delle loro interazioni vengono utilizzate simulazioni differenti (ad esempio la *Mixed2*, che prevede masse minori). I risultati indicano che, approssimativamente, i sistemi che presentano giganti ghiacciati (per i cui dischi vengono assunti valori medi di massa come precedentemente discusso per i giganti gassosi) possono eiettare nello spazio interstellare **da 0.1 a 10 masse terrestri** nel corso della loro vita^{2,20}.

1.2.4 Contributo totale alla densità di massa

Riprendendo i risultati precedenti, sappiamo che la popolazione stellare che rientra in un raggio $\sim 5.2pc$ dal sistema solare presenta pianeti massivi secondo le seguenti frequenze:

- presenza di (almeno) un gigante gassoso nell'1 – 10% delle stelle;
- presenza di (almeno) un gigante ghiacciato nel 10 – 50% delle stelle;

E ricordando che ogni sistema contenente almeno uno dei suddetti corpi massivi nel corso della loro evoluzione eietta nello spazio una quantità di materiale in planetesimi approssimativamente pari a:

- $\sim 1 - 100M_{\oplus}$ per i sistemi con giganti gassosi;
- $\sim 0.1 - 10M_{\oplus}$ per i sistemi con giganti ghiacciati;

è possibile concludere che il contributo dei giganti gassosi all'eiezione di materia *per stella* risulta pari a:

$$M_{ejected,gas} \approx (1 - 10\%) \times (1 - 100M_{\oplus}) = 0.01 - 10M_{\oplus} \quad (1.3)$$

mentre il contributo dovuto ai giganti ghiacciati *per stella* è:

$$M_{ejected,ice} \approx (10 - 50\%) \times (0.1 - 10M_{\oplus}) = 0.01 - 5M_{\oplus} \quad (1.4)$$

La quantità di materia totale eiettata per stella sarà allora pari a:

$$M_{ejected,star} \approx M_{ejected,gas} + M_{ejected,ice} = 0.02 - 15M_{\oplus} \quad (1.5)$$

E, dal momento che abbiamo stimato il limite inferiore della densità numerica in stelle nei dintorni del sistema solare essere all'incirca pari a $\rho_{star,num} \sim$

1.2. STIMA DELLA DENSITÀ DI MASSA DEI PLANETESIMI NELLO SPAZIO INTERSTELLARE

$0.2pc^{-3}$, possiamo concludere che un **limite inferiore alla densità di massa del materiale eiettato dai dischi di detriti presente nello spazio interstellare** sarà dato da:

$$\rho_{mass,interstellar} \approx M_{ejected,star} \times \rho_{star,num} = 0.004 - 3M_{\oplus}pc^{-3} \quad (1.6)$$

Capitolo 2

Dinamica dei due oggetti interstellari 1I/'Oumuamua e 2I/Borisov

Presentiamo in questo capitolo un breve excursus sulle generalità dei due oggetti interstellari finora scoperti e osservati, soffermandoci in particolar modo sulla loro dinamica e accennando le caratteristiche fisiche, che risulteranno utili per alcune discussioni della terza sezione.

2.1 1I/'Oumuamua

1I/'Oumuamua è stato il primo oggetto interstellare scoperto. Fu osservato la notte del 18 ottobre 2017 UT al *Pan-STARRS1 (PS1) Near Earth Object Survey*¹⁰, e rappresenta un'importante scoperta in quanto ha testimoniato l'esistenza di oggetti che sino ad allora erano stati solo ipotizzati (seppur da decine di anni), ma mai osservati.

2.1.1 Dinamica

Il rapido moto di Oumuamua ha fatto sì che la finestra osservativa per il suo studio fosse temporalmente piuttosto limitata: fu scoperto tre giorni dopo il passaggio alla minima distanza dalla Terra ($0.16 au$), e da allora la sua luminosità è andata diminuendo molto velocemente (di un fattore 10 dopo una settimana, 100 dopo un mese). Nonostante ciò la sua orbita è stata studiata con sufficiente precisione e non vi sono dubbi riguardo al fatto che la sua provenienza sia estranea al sistema solare. La sua **eccentricità** infatti

2.1. II/'OUMUAMUA

è stata misurata con elevata precisione, e risulta $e \sim 1.2$, definendo un'orbita certamente iperbolica rispetto al Sole¹⁰, e la sua elevata inclinazione rispetto al piano di equilibrio del sistema solare esclude possibili perturbazioni da parte dei pianeti.

È interessante citare il fatto che Oumuamua sembra provenire da una direzione situata a circa 6° dall'*apice solare*, che rappresenta il "punto" verso cui si sta muovendo il sistema solare all'interno della Via Lattea, nonché la direzione dalla quale è effettivamente più probabile che il sistema solare intercetti un corpo estraneo¹⁰.

Un ultimo importante dettaglio dinamico riguarda le cosiddette *accelerazioni non-gravitazionali* che sono state misurate su Oumuamua. Uno studio dettagliato sull'astrometria dell'oggetto in questione¹¹ basato su tutte le osservazioni eseguite (da ottobre 2017 a gennaio 2018, le prime tramite *Pan-STARRS1* e le ultime grazie ad *Hubble Space Telescope*) ha dimostrato che un'orbita puramente gravitazionale non era in grado di spiegare completamente i dati osservativi. L'unico modo per ovviare a questo problema è stato quello di inserire una componente di *accelerazione radiale* che scala come $1/r^2$, con r distanza dal Sole. Questo tipo di accelerazione radiale viene frequentemente utilizzata negli studi delle orbite cometarie, e potrebbe portare a una serie di interessanti conclusioni sull'attività di Oumuamua.

In particolare, la "perdita di massa" dovuta ad attività cometaria necessaria a spiegare l'entità dell'accelerazione non-gravitazionale osservata dovrebbe essere dell'ordine di 1 kg s^{-1} . Perdite di massa di questo tipo possono essere studiate coi modelli di "*outgassing*" cometario, e assumendo che Oumuamua abbia dimensioni dell'ordine dei 100m è possibile spiegarla, alla distanza osservata, con una specifica attività cometaria¹³. Una tipica cometa a questi livelli di outgassing produrrebbe polveri di ogni dimensione, ma l'assenza della coda dovuta alla pressione di radiazione posta in direzione radiale rispetto al Sole implica che le particelle di polvere emesse, nel caso in cui fossero effettivamente presenti, dovrebbero avere dimensioni elevate (dell'ordine del millimetro). Polveri più sottili non sono infatti state osservate¹¹, e purtroppo non è stato possibile eseguire osservazioni sensibili alle polveri più spesse, che risultano ben più rintracciabili in radio. L'alternativa sarebbe stata l'individuazione diretta dei fenomeni di outgassing, ma il breve periodo di osservazione e la vicinanza al sole non hanno permesso uno studio di questo tipo.

Per tentare di dare una spiegazione a questa "mancata attività" è stato proposto che Oumuamua abbia subito una sublimazione dei propri ghiacci superficiali a causa di ripetuti passaggi vicino alla propria stella di appartenenza

prima di essere stata eiettata dal sistema, il che trova riscontro in alcuni modelli che si rifanno a comete del sistema solare della stessa dimensione del corpo in questione ($\sim 100m$)^{12,14}. Rimane però il problema della velocità radiale, per il quale sono sorte una serie di ipotesi alternative, la più accreditata delle quali consiste nel giustificarla con l'effetto della pressione di radiazione solare sulla superficie. Il problema è che questa ipotetica soluzione implicherebbe che Oumuamua abbia una densità 3-4 ordini di grandezza inferiore a quella dei tipici asteroidi di simili dimensioni che conosciamo²⁰.

La questione della velocità radiale di Oumuamua rimane quindi ancora parzialmente irrisolta, e ad oggi questo corpo viene definito *asteroide* (e non cometa) *interstellare*.

2.1.2 Cenni sugli aspetti fisici

La luminosità osservata di Oumuamua implica che, data la sua distanza, le sue dimensioni siano dell'ordine dei $100m$. Più precisamente, i limiti inferiore e superiore del flusso osservato implicano che le sue dimensioni siano comprese tra 49 e $220 m$, a seconda delle proprietà fisiche della sua superficie²⁰. L'albedo, la quantità di polvere depositata, la dimensione media di quest'ultima, la presenza di materiale organico sono tutti fattori che influiscono sull'effettiva dimensione di Oumuamua a parità di flusso osservato, la cui analisi non ha potuto fornire risultati precisi a causa del limitato tempo di osservazione e della lontananza dell'oggetto. Il colore, tendente al rosso, ha potuto fornire qualche informazione grazie al confronto con la superficie di asteroidi noti del sistema solare, ma nulla di realmente conclusivo: esso potrebbe testimoniare un'abbondanza di materiale organico, così come di minerali ricchi di ferro, o una superficie particolarmente alterata²⁰. ²⁰ La forma di Oumuamua non è ancora stata definita con precisione in quanto non è stato possibile risolverne l'immagine (vedi *figura 2.1*). Studi sulla curva di luce però hanno fornito, in seguito a considerazioni sugli angoli di fase e sullo stato di rotazione dell'asteroide, un valore *minimo* del rapporto tra il suo asse maggiore e il suo asse minore pari a $6:1$ ²⁰, il che potrebbe implicare sia una forma a ovale "appiattito", sia una forma a ellissoide stretto e allungato.

Assumendo per Oumuamua dei parametri di scattering superficiale tipici delle comete, si ottiene un raggio di circa $70m$ e un albedo di 0.1 ²⁰. Corpi cometari aventi queste caratteristiche nel sistema solare esistono, ma ne sono stati osservati e caratterizzati fisicamente un numero relativamente ridotto, ragion per cui un confronto diretto con le caratteristiche di Oumuamua risulta impossibile.

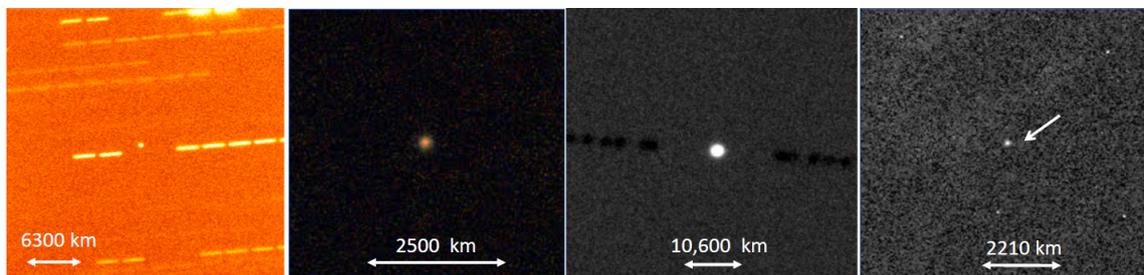


Figura 2.1: Sequenza di immagini acquisite di 1I/'Oumuamua che mettono in evidenza la sua apparenza puntiforme e non risolta nella forma^{10,11}. Proseguendo da sinistra a destra: esposizione di 0.4 ore con l'utilizzo di un filtro in banda R ottenuta col Nordic Optical Telescope il 26 ottobre 2017; immagine a colori reali ottenuta da un'esposizione di 1.6 ore col Gemini South Telescope il 27 ottobre 2017; immagine composta ottenuta da un'esposizione profonda di 3.6 ore in banda *r* grazie al Gemini North Telescope, tra il 27 e il 28 ottobre 2017; un'immagine F350LP ottenuta da Hubble Space Telescope. *The 'Oumuamua ISSI Team (2019)*.

Per una lista aggiornata delle specifiche fisiche e dinamiche di 1I/'Oumuamua si rimanda al database online del Jet Propulsion Laboratory della NASA o del Minor Planet Center.

2.2 2I/Borisov

2I/Borisov è il secondo oggetto interstellare osservato¹⁵, e fu scoperto da Gennady Borisov la notte del 30 agosto 2019 UT dal suo osservatorio personale, per mezzo di un telescopio riflettore di $0,65m$ di diametro da lui stesso costruito.

2.2.1 Dinamica

In seguito alla sua scoperta è stata acquisita una gran quantità di dati da differenti campagne osservative, i quali hanno permesso di definirne accuratamente l'orbita e di concludere che si tratta di un oggetto estraneo al sistema solare. L'orbita misurata prevede una velocità di eccesso iperbolico di $\sim 32 \text{ km s}^{-1}$, il che risulta essere consistente con le predizioni teoriche e implica un'orbita fortemente iperbolica¹⁵. L'eccentricità è stata calcolata, e risulta essere $e = 3.38 \pm 0.02$: anche in questo caso la provenienza dallo spazio interstellare è garantita, dal momento che l'elevata inclinazione del corpo rispetto al piano di equilibrio del sistema solare garantisce che la forte

iperbolicità dell'orbita non può essere dovuta a perturbazioni da parte dei pianeti.

2I/Borisov presenta inoltre due componenti di accelerazione non-gravitazionale rispettivamente pari a $A_1 = 7.43 \pm 0.07 \times 10^{-4} \text{ au } d^{-2}$ e $A_2 = -1.83 \pm 0.01 \times 10^{-4} \text{ au } d^{-2}$ alla distanza di 1 au dal Sole. Tali componenti risultano essere estremamente elevate rispetto a quelle presentate dalle comete a causa della loro attività alla medesima distanza dal Sole, superandole anche di due o tre ordini di grandezza. In ogni caso, una soluzione puramente gravitazionale che implica un'orbita fortemente iperbolica sembra rappresentare bene i dati. Per mettere in evidenza questo fatto sono stati posti in grafico i *residui* in ascensione retta (RA) e declinazione (Dec) (da intendersi come differenza tra il valore predetto e quello osservato) rispetto a varie soluzioni (vedi *figura 2.2*): risulta evidente che essi vengano minimizzati per la soluzione (**e,f**) che implica un'orbita fortemente iperbolica e assenza di forze non-gravitazionali¹⁵.

2.2.2 Cenni sugli aspetti fisici

La prima importante caratteristica di 2I/Borisov è quella di possedere una *chioma* e una *coda* particolarmente estesa e debole, com'è possibile notare dalle immagini riportate in *figura 2.3*. È stato poi misurato l'indice di colore g'-r': l'oggetto sembra essere caratterizzato da un colore tendente al rosso, tipico di alcune comete appartenenti al sistema solare. Il nucleo non è stato osservato direttamente a causa della luminosità diffusa, ma alcune analisi fotometriche hanno fornito per il suo raggio un valore $\sim 1 \text{ km}$, seppur con un'elevata incertezza¹⁵. Ciò rappresenterebbe una dimensione tipica per un nucleo cometario generico di quelli conosciuti e osservati. Basandosi sulle caratteristiche finora descritte e ignorando l'iperbolicità dell'orbita, 2I/Borisov appare indistinguibile da una qualsiasi cometa appartenente al sistema solare.

In base a quanto osservato risulta quindi evidente che 2I/Borisov rappresenti il primo caso accertato di *cometa interstellare*, e il secondo oggetto interstellare generico mai osservato, dopo 1I/'Oumuamua.

2.2. 2I/BORISOV

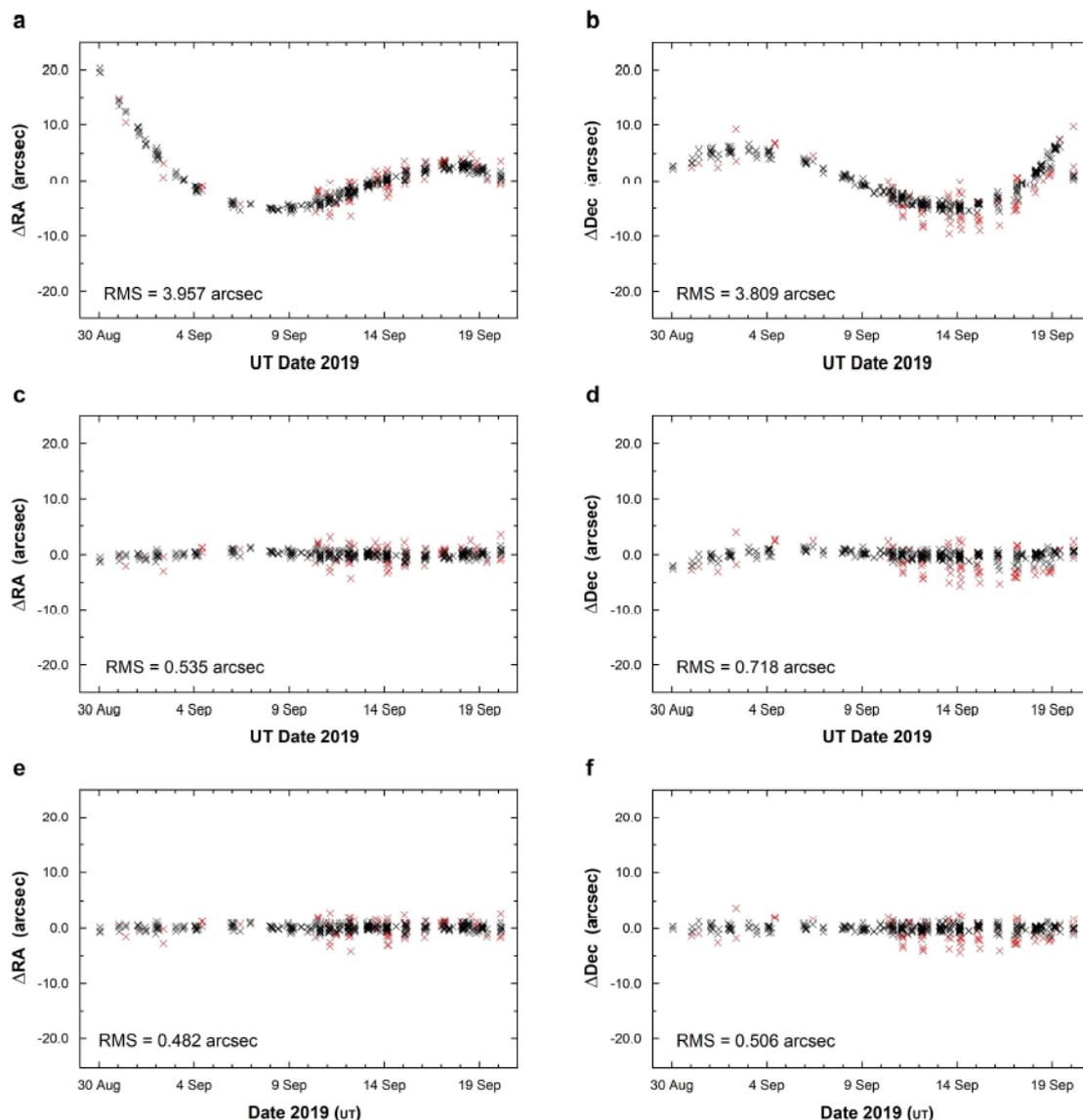


Figura 2.2: **Residui in ascensione retta e in declinazione di 2I/Borisov per tre differenti soluzioni orbitali.** **a** e **b** rappresentano una soluzione parabolica priva di forze non-gravitazionali. **c** e **d** implicano anch'essi una soluzione parabolica, ma in presenza di forze non-gravitazionali. **e** e **f** infine rappresentano una soluzione puramente gravitazionale con orbita iperbolica. Sono stati messi in evidenza sia i residui per l'ascensione retta che per la declinazione in quanto essi si presentano in maniera indipendente. Le croci nere indicano dati validi e utilizzati nella computazione, quelle rosse identificano valori anomali respinti. *Guzik P. et al. (2019)¹⁵*.

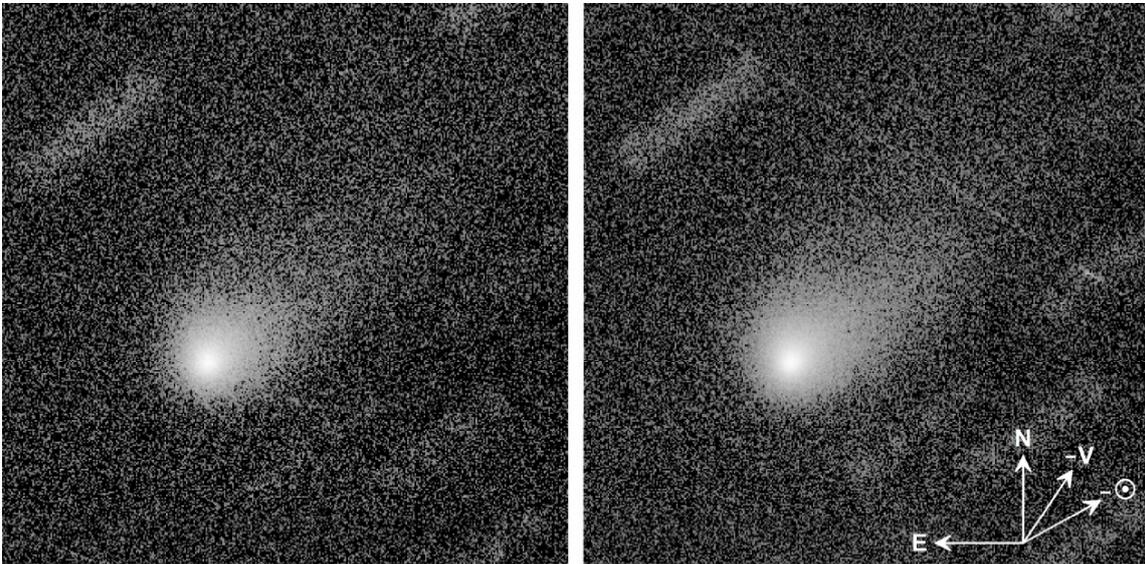


Figura 2.3: Immagini acquisite il 13 settembre 2019 UT dal Gemini North Telescope. L'immagine a sinistra è stata acquisita in banda g' , quella a destra in banda r' . Entrambi i pannelli sottendono un'area di cielo pari a 1.0×1.0 *arcmin*. Le frecce in basso a destra evidenziano le direzioni nord (N) ed est (E), il vettore antisolare proiettato sul piano di osservazione ($-\odot$), e la direzione della velocità orbitale presa negativamente ($-V$).

Capitolo 3

Confronto tra osservazioni e modelli teorici

L'ultima sezione di questa tesi vuole presentare e cercare di dare un senso all'importante questione del confronto dei dati osservativi con le predizioni teoriche dei modelli evolutivi e delle simulazioni. Il problema è in realtà assai ampio: i meccanismi coinvolti nei modelli di formazione dei dischi protoplanetari e di eiezione di planetesimi sono estremamente numerosi e complessi, e dipendono da svariate assunzioni e condizioni al contorno. Migliorarli vuol dire "stringere il cerchio", ottenendo dalle osservazioni informazioni (soprattutto di carattere statistico) sempre più precise, che ci permettono di escludere man mano quelle assunzioni che non rappresentano la realtà, o eventualmente di riformulare le nostre teorie. Ricordiamo infatti che l'osservazione diretta degli oggetti interstellari rappresenta un settore del tutto nuovo dell'astronomia osservativa, che ha fornito i suoi primi risultati in tempi recentissimi: per questo motivo un ragionamento del genere trova forte sostegno. Nel nostro caso ci limiteremo a mettere in evidenza come le osservazioni siano essenziali per determinare un'importantissima funzione, la *Size Frequency Distribution* (SFD), che verrà discussa dettagliatamente nel seguito.

3.1 Legame tra densità numerica e densità di massa: la SFD

Nella sezione 1.2 è stato stimato, con l'ausilio delle dovute approssimazioni, un limite inferiore alla *densità di massa* degli oggetti rocciosi e ghiacciati che sappiamo popolare lo spazio interstellare, che è risultato essere

3.2. STIMA DELLA SFD

$\rho_{mass,interstellar} \approx 0.004 - 3 M_{\oplus}pc^{-3}$. Tuttavia, né questo dato né i ragionamenti che ci hanno portato a definirlo forniscono informazioni su quanto gli oggetti in questione siano grandi, o ancor meglio sulla *distribuzione* delle loro dimensioni. Non sappiamo, ad esempio, se prevalgano oggetti dell'ordine del metro o magari delle decine di chilometri. Se vogliamo infatti passare dalla densità di massa alla *densità numerica*, è assolutamente necessario conoscere la funzione che descrive il modo in cui le dimensioni degli oggetti interstellari sono distribuite: tale funzione è detta *Size-Frequency Distribution (SFD)*²⁰. Si tratta di una funzione del tipo $N(r)$ con N numero di oggetti aventi raggio r , e la sua estrapolazione empirica risulta essere un punto chiave di questa branca dell'astronomia. La stima per via teorica risulta un argomento troppo complesso a causa dell'enorme quantità di fattori da cui dipende la forma della SFD: l'unico modo per avere un valore ragionevolmente preciso e affidabile è basarsi sui dati osservativi.

3.2 Stima della SFD

3.2.1 Il problema della mancanza di dati

Una buona stima della SFD può essere facilmente ricavata analizzando un campione sufficientemente ampio di oggetti interstellari le cui dimensioni siano note con la dovuta precisione. Purtroppo ad oggi gli oggetti osservati sono solamente *due*, e un approccio del genere risulta ancora impensabile. Una buona stima della SFD potrà essere ottenuta quando saranno state caratterizzate diverse decine di questi oggetti, in maniera tale da avere a disposizione un campione sufficientemente ampio da garantire una buona validità statistica. Come osserveremo in seguito, il pronostico dei tempi necessari per un campionamento del genere è di qualche decina d'anni.

Vedremo tuttavia che grazie ad alcune considerazioni è comunque possibile sfruttare i pochi dati osservativi a nostra disposizione per ottenere qualche restrizione sulla SFD, seppur mantenendo un'elevata incertezza.

3.2.2 Vincoli apportati dalle attuali osservazioni

Il caso di 1I/'Oumuamua. La scoperta del primo asteroide interstellare è stata, per molteplici aspetti, una fonte di sorprese. In primo luogo, non ci si aspettava che il primo oggetto individuato non fosse una cometa interstellare. Una cometa infatti sarebbe risultata molto più luminosa, e quindi più facile da osservare. La seconda caratteristica interessante di Oumuamua è la sua dimensione: dal momento che ci si attendeva di osservare un corpo

cometario le previsioni hanno favorito un nucleo dell'ordine del km , sulla base delle nostre conoscenze dei nuclei cometari che popolano la nube di Oort del sistema solare. L'asteroide in questione presenta invece dimensioni dell'ordine dei $\sim 100m$, il che rende ancora più sorprendente la sua scoperta²⁰. Inoltre, dal momento che l'osservazione oggetti così piccoli è limitata ai NEO (*near-Earth objects*), non disponiamo di un catalogo così ampio da poter confrontare efficacemente le caratteristiche di Oumuamua con quelle di corpi a noi noti. Tuttavia da un altro punto di vista ciò rappresenta un vero colpo di fortuna, in quanto è possibile predire, seppur grossolanamente, la densità numerica di oggetti di questo tipo attesa nello spazio interstellare, analizzando le possibilità che avevamo di individuarlo sulla base delle capacità di Pan-STARRS1^{16,17}. In ultimo, la forma estremamente allungata (o appiattita) di Oumuamua rappresenta una terza peculiarità che ha messo in discussione diverse teorie di formazione di planetesimi e dei meccanismi mareali in grado di disgregare una parte di essi producendo asteroidi aventi questa particolare forma e dimensione.

Il caso di 2I/Borisov. Il secondo oggetto scoperto non rappresenta, purtroppo, un'importante fonte di informazioni quanto il primo. 2I/Borisov infatti rientra perfettamente nelle casistiche attese per un tipico oggetto interstellare, essendo come abbiamo detto sostanzialmente indistinguibile da una cometa del sistema solare, se non per la sua provenienza. Le dimensioni del nucleo si rifanno perfettamente ai valori tipici delle comete "nostrane"¹⁵, e la sua composizione ha portato al massimo a qualche discussione sulle differenze con le comete note (e quindi sulla sua origine), ma nulla che riguardi la dinamica o la SFD. Per questo motivo e per il fatto che la sua scoperta relativamente recente fa sì che gli studi e l'analisi dei dati siano tuttora in corso, non sono ancora state tratte informazioni realmente utili sulla SFD degli oggetti interstellari e i risultati che verranno presentati si rifaranno solamente agli studi eseguiti su 1I/'Oumuamua.

Densità numerica attesa secondo le osservazioni di 1I/'Oumuamua.

Un'accurata analisi eseguita da Do A. et al. (2018)¹⁷ ha tentato di stimare la *densità numerica attesa* di oggetti interstellari aventi dimensioni pari a quelle di Oumuamua o maggiori, secondo le probabilità che aveva Pan-STARRS1 di individuare un oggetto con tali caratteristiche. In particolare, l'analisi tiene conto della magnitudine apparente di Oumuamua, del volume totale in cui PS1 avrebbe potuto osservare Oumuamua durante il suo passaggio, della durata di una tipica campagna osservativa (~ 80 *giorni*), della velocità dell'asteroide, della sua direzione di arrivo, della massima distanza a cui PS1 avrebbe potuto osservarlo, dell'efficienza con la quale PS1 può scrutare le varie aree di cielo e da numerosi altri fattori. La stima ottenuta è di

3.2. STIMA DELLA SFD

circa $0.1-0.2$ oggetti per au cubica, ed è applicabile a corpi che presentino un'attività minima o nulla, come quello in questione. Una densità numerica del genere implica che il sistema solare sia costantemente attraversato da oggetti di questo tipo, che sfuggono alle nostre osservazioni a causa della magnitudine apparente troppo elevata.

Confronto e stima della SFD. Per passare dalla densità di massa $\rho_{mass,interstellar}$ stimata nella sezione 1.2 alla densità numerica, è necessario basarsi su una SFD. Abbiamo visto che la stima dedotta a causa delle numerose approssimazioni si estende su ben tre ordini di grandezza: se a questo aggiungiamo il fatto che la densità numerica che ne consegue dipende fortemente dalla SFD scelta, l'intervallo di incertezza aumenta ulteriormente, e molto fortemente. Verrà presentato in questa sezione l'esempio fornito dagli studi del *'Oumuamua ISSI Team (2019)*²⁰, che mostra bene come la densità numerica dipenda fortemente dalla SFD assunta.

Sono state prese in considerazione in particolare tre tipologie di SFD, tutte aventi la forma di una legge di potenza $N(m) \propto m^{-x}$ per le quali vengono definiti i raggi r_{min} e r_{max} entro cui vogliamo studiare la distribuzione. Il raggio massimo è uguale per tutte e vale $r_{max} = 100km$, perciò i parametri che varieranno all'interno delle singole leggi saranno x e r_{min} . Abbiamo:

- **a_{1-3} : distribuzioni a pura legge di potenza.**
 - **a_1** : $r_{min} = 100m$, $x = 0.6$, consistente con le simulazioni di formazione dei planetesimi;
 - **a_2** : $r_{min} = 50m$, $x \simeq 0.83$, con assunzione di equilibrio collisionale;
 - **a_3** : $r_{min} = 50m$, $x = 1.2$, con massa dominata da oggetti piccoli (ottenuta dall'estrapolazione della SFD dei massi della cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko scalata a dimensioni maggiori);
- **b_{1-3} : distribuzioni a pura legge di potenza con una piccola frazione ($\sim 1\%$ della massa) convertita in frammenti di dimensione paragonabile a Oumuamua.**
 - **b_1** : 99% della massa in distribuzione **a_2** , 1% in frammenti di 50m;
 - **b_2** : 97% della massa in distribuzione **a_1** , 3% in frammenti di 50m;
 - **b_3** : assume che tutti gli oggetti interstellari siano grandi quanto Oumuamua (100m);
- **c_{1-3} : distribuzioni a legge di potenza a due componenti.**

- **c₁**: $r_{min} = 50m$, $x = 0.6$ per oggetti più grandi di $r_{break} = 1km$,
 $x \simeq 0.83$ per quelli più piccoli;
- **c₂**: $r_{min} = 50m$, $x = 0.6$ per oggetti più grandi di $r_{break} = 10km$,
 $x \simeq 0.83$ per quelli più piccoli;
- **c₃**: $r_{min} = 50m$, $x = 0.6$ per oggetti più grandi di $r_{break} = 10km$,
 $x = 1.2$ per quelli più piccoli.

In *figura 3.1* sono riportate le SFD sopra descritte. Alle ascisse non abbiamo alcun valore particolare ma soltanto le varie tipologie di SFD suddivise da uno spazio, mentre alle ordinate troviamo la densità numerica che deriva da ogni SFD assunta. La lunghezza del segmento di ogni singola SFD è dovuta al fatto che esse sono state applicate all'intervallo di densità di massa che abbiamo calcolato nella sezione 1.2 (difatti ogni segmento si estende proprio su tre ordini di grandezza).

Dalla figura è possibile osservare che a seconda della SFD assunta l'intervallo di densità numerica che ne deriva può variare fortemente. Ad esempio la distribuzione **a₁**, caratteristica delle simulazioni di formazione dei planetesimi, richiederebbe un'enorme quantità di massa eiettata da ogni stella (dell'ordine delle migliaia di masse terrestri) per soddisfare i vincoli imposti dalle osservazioni di Oumuamua¹; alcune simulazioni che coinvolgono una certa percentuale di frammenti invece (le **b**) sembrano rientrare, per determinati valori della densità di massa assunti, nelle restrizioni apportate. In effetti andare a "centrarsi" nella fascia grigia in evidenza nel grafico non è così difficile: la difficoltà maggiore deriva dal fatto che le SFD assumibili sono innumerevoli, e quelle qui riportate ne rappresentano solo una piccola frazione (tra l'altro esse sono particolarmente "semplici", ma nulla esclude a priori possibili SFD più complesse). L'incertezza quindi deriva per gran parte dalla tipologia di SFD presa in considerazione, e questo ci permette di capire quanto siano importanti le osservazioni future per la valutazione empirica di questa essenziale distribuzione.

3.3 Cenni sulle probabilità di osservazione

L'osservazione del primo oggetto interstellare 1I/'Oumuamua ha portato, oltre agli importati contributi discussi in precedenza, anche a una stima del numero di oggetti interstellari che, per mezzo delle attuali tecnologie, dovremmo poter osservare ogni anno. In particolare in uno studio riportato da Jewitt D. et al. (2017)¹⁸, tenendo conto delle probabilità di osservazione di Oumuamua ottenute sulla base di svariati fattori (forma/luminosità dell'oggetto, velocità

3.3. CENNI SULLE PROBABILITÀ DI OSSERVAZIONE

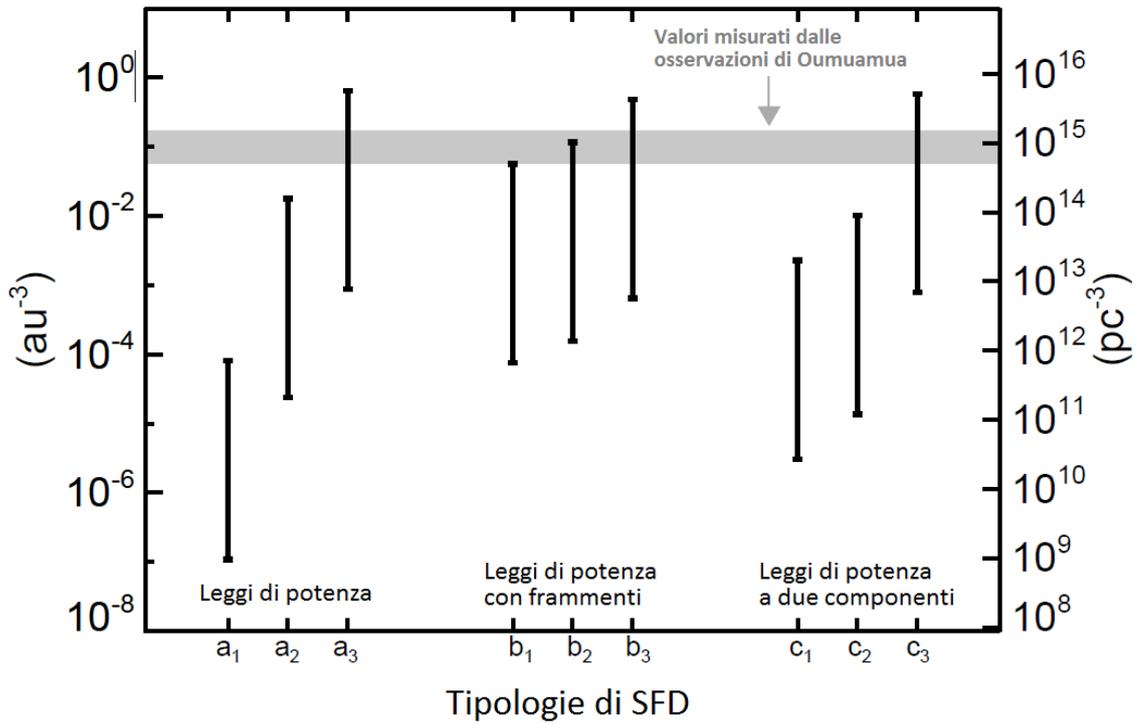


Figura 3.1: **Densità numerica dedotta dall'assunzione di differenti SFD.** Il risultato qui riportato si riferisce a una fissata densità di massa, pari a $\rho_{mass,interstellar} \approx 0.004 - 3 M_{\oplus} \text{pc}^{-3}$. Risulta evidente come la densità numerica dipenda fortemente dalla SFD assunta, venendo variata anche di diversi ordini di grandezza (maggiori informazioni nel testo). *Immagine tratta dal lavoro del 'Oumuamua ISSI Team di luglio 2019 e tradotta in italiano.*

di percorrenza dell'orbita, direzione di provenienza, capacità osservative di Pan-STARRS1 ecc), è stato calcolato che le osservazioni dovrebbero fornire, mediamente, da 0.5 a 1 oggetto interstellare all'anno. 2I/Borisov, osservato circa due anni dopo Oumuamua, rientra quindi nella statistica prevista. Questa informazione riveste un ruolo piuttosto importante, in quanto come abbiamo detto per valutare empiricamente la SFD con sufficiente precisione è necessario aver osservato almeno qualche decina di oggetti. Ciò implica che per ottenere una buona stima sarà necessario ancora *almeno un decennio o più*, e ci fa capire quanto sia importante investire sul futuro delle osservazioni degli oggetti interstellari per ottenere informazioni cruciali sulla loro natura.

3.3. CENNI SULLE PROBABILITÀ DI OSSERVAZIONE

Conclusioni

A fronte delle considerazioni fatte riguardo le previsioni teoriche sulla *densità di massa* di oggetti interstellari è risultato evidente che non sia possibile prevedere questa quantità con estrema precisione. È tuttavia stato messo in luce quanto sia importante ottenere un valore anche affetto da un'elevata incertezza, in quanto esso rappresenta comunque un punto di partenza essenziale per un eventuale ed importante confronto con le osservazioni: in questo modo è infatti possibile, tra le molte cose, testare e fornire una certa validità ai modelli di formazione dei dischi protoplanetari attualmente sviluppati. A seguito delle discussioni su questo cruciale confronto è risultato chiaro che per legare efficacemente dati osservativi e previsioni sia assolutamente necessario determinare con precisione la SFD per gli oggetti interstellari, e si è osservato come l'unica via realmente efficace sia quella di affidarsi a una valutazione empirica basata su numerose osservazioni. Si è visto come già dall'osservazione dell'asteroide interstellare 1I/'Oumuamua sia stato possibile trarre informazioni molto utili sulla SFD, definendone i primi vincoli, e una volta osservato come l'incertezza sulla densità di massa degli oggetti interstellari dedotta dai dati osservativi dipenda principalmente proprio dalla SFD si è reso evidente come un numero elevato di osservazioni rappresenti un punto cruciale per comprendere l'origine di questi oggetti ed effettuare studi rigorosi sulla loro popolazione nello spazio interstellare. Di fatto è risultato chiaro quanto anche dall'osservazione di un solo oggetto sia possibile ricavare una grande quantità di informazioni, tanto da riuscire a definire una previsione (nemmeno troppo imprecisa) sulla quantità di oggetti che verranno individuati nei prossimi anni e arrivando così a fornire un pronostico sulle tempistiche necessarie a una buona valutazione della SFD, sulla base delle attuali possibilità osservative.

3.3. CENNI SULLE PROBABILITÀ DI OSSERVAZIONE

Bibliografia

- [1] Raymond, S. N., Armitage, P. J., Veras, D., Quintana, E. V. & Barclay, T. Implications of the interstellar object 1I/'Oumuamua for planetary dynamics and planetesimal formation. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **476**, 3031–3038 (2018).
- [2] Raymond, S. N., Armitage, P. J. & Gorelick, N. Planet-Planet Scattering in Planetesimal Disks. II. Predictions for Outer Extrasolar Planetary Systems. Astrophys. J. **711**, 772–795 (2010).
- [3] Kroupa, P., Tout, C. A. & Gilmore, G. The distribution of low-mass stars in the Galactic disc. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **262**, 545–587 (1993).
- [4] Cassan, A. et al. One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations. Nature **481**, 167–169 (2012).
- [5] Mayor, M. et al. The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets. arXiv e-prints (2011).
- [6] Wyatt, M. C. Evolution of Debris Disks. Annu. Rev. Astron. Astrophys. **46**, 339–383 (2008).
- [7] Winn, J. N. & Fabrycky, D. C. The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems. Annu. Rev. Astron. Astrophys. **53**, 409–447 (2015).
- [8] Suzuki, D. et al. The Exoplanet Mass-ratio Function from the MOA-II Survey: Discovery of a Break and Likely Peak at a Neptune Mass. Astrophys. J. **833**, 145 (2016).
- [9] Cumming, A. et al. The Keck planet search: detectability and the minimum mass and orbital period distribution of extrasolar planets. Publ. Astron. Soc. Pac. **120**, 531–554 (2008)
- [10] Meech, K. J. et al. A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid. Nature **552**, 378–381 (2017).

- [11] Micheli, M. et al. Non-gravitational acceleration in the trajectory of 1I/2017 U1 ('Oumuamua). Nature **559**, 223–226 (2018).
- [12] Raymond, S. N., Armitage, P. J. & Veras, D. Interstellar Object 'Oumuamua as an Extinct Fragment of an Ejected Cometary Planetesimal. Astrophys. J. Lett. **856**, L7 (2018).
- [13] Meech, K. J. & Svoren, J. Using cometary activity to trace the physical and chemical evolution of cometary nuclei, Comets II (ed. M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver) 317–335 (2004).
- [14] Nesvorný, D. et al. Origin and Evolution of Short-period Comets. Astrophys. J. **845**, 27 (2017).
- [15] Guzik, P. et al. Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov. Nature Astronomy **4**, 53-57 (2020)
- [16] Engelhardt, T. et al. An Observational Upper Limit on the Interstellar Number Density of Asteroids and Comets. Astron. J. **153**, 133 (2017).
- [17] Do, A., Tucker, M. A. & Tonry, J. Interstellar Interlopers: Number Density and Origin of 'Oumuamua-like Objects. Astrophys. J. Lett. **855**, L10 (2018).
- [18] Jewitt, D. et al. Interstellar interloper 1I/2017 U1: observations from the NOT and WIYN telescopes. Astrophys. J. Lett. **850**, L36 (2017).
- [19] Izidoro, A., Morbidelli, A., Raymond, S. N., Hersant, F. & Pierens, A. Accretion of Uranus and Neptune from inward-migrating planetary embryos blocked by Jupiter and Saturn. Astron. Astrophys. **582**, A99 (2015).
- [20] The 'Oumuamua ISSI Team. The natural history of 'Oumuamua. Nature Astronomy **3**, 594–602, (2019).
- [21] Pfalzner, S., Steinhausen, M. & Menten, K. Short Dissipation Times of Proto-planetary Disks: An Artifact of Selection Effects? Astrophys. J. **793**, L34 (2014).
- [22] Wright, J. T. et al. The frequency of hot jupiters orbiting nearby solar-type stars The Astrophysical Journal Vol. **753**, number 2 (2012)
- [23] Howard et al. The Occurrence and Mass Distribution of Close-in Super-Earths, Neptunes, and Jupiters Science Vol. **330**, Issue 6004, pp. 653-655 (2010)
- [24] Fressin, F. et al. The false positive rate of KEPLER and the occurrence of planets The Astrophysical Journal Vol. **766**, Number 2 (2013)

-[25] Petigura, E., Howard, A., Marcy, G., Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars Proc Natl Acad Sci U S A 110(48):19652 (2013)