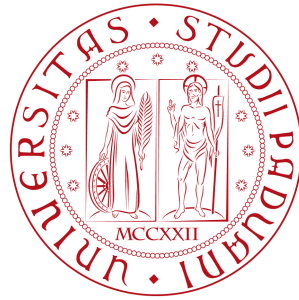


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Esiste un nono pianeta nel sistema solare?

Relatore:
Prof.
Stefano Casotto

Candidato:
Stefano Cammisa
Matr.:1099672

Anno Accademico 2016-2017

Sommario

Le recenti scoperte riguardanti le orbite degli oggetti trans-nettuniani hanno indotto molti autori a ipotizzare l'esistenza di un corpo perturbatore massiccio posto ai limiti del sistema solare, denominato Pianeta Nove, per spiegare alcune peculiarità quali clustering in argomento del perielio, longitudine del nodo ascendente e longitudine del perielio di alcuni oggetti distanti noti. Questi effetti non sembrano essere causati da bias osservativi. La presenza di tale pianeta potrebbe anche spiegare l'esistenza di oggetti altamente inclinati e retrogradi e l'inclinazione assiale del Sole. Numerose simulazioni effettuate da moltissimi autori hanno portato a varie ipotesi per il Pianeta Nove restringendo il range di parametri a massa $m_9 \sim 5 - 20m_T$, semiasse maggiore $a_9 \sim 350 - 1000$ UA, inclinazione $i_9 \sim 22^\circ - 40^\circ$, eccentricità $e_9 \sim 0,5 - 0,8$, argomento del perielio $\omega_9 \sim 138^\circ$, longitudine del perielio $\varpi_9 \sim 251^\circ$ e longitudine del nodo ascendente $\Omega_9 \sim 113^\circ$. La posizione attuale del pianeta è stimata essere $\nu_9 = 117,8^{+11}_{-10}^\circ$ o in una regione vicina all'afelio della sua orbita. Varie ipotesi (migrazione, formazione *in situ*, cattura) falliscono nello spiegare a pieno l'origine di un pianeta a tale distanza. La presenza di due pianeti, invece che uno solo, è stata proposta per spiegare ulteriori anomalie della Fascia di Kuiper non implicabili al Pianeta Nove. La ricerca di pianeti nel sistema solare esterno è molto difficile e le ipotesi su massa, orbita e posizione sono limitate dal ridotto numero di oggetti trans-nettuniani estremi noti. Ad oggi la presenza del Pianeta Nove sembra probabile anche se le teorie presentano ancora alcuni punti deboli, ma nel prossimo futuro nuove survey e nuovi telescopi potrebbero portare a una risoluzione definitiva della questione, con la scoperta del pianeta o l'esclusione della sua esistenza.

Indice

Introduzione	2
1 Evidenze dell'esistenza del Pianeta Nove	5
1.1 Orbite degli oggetti trans-nettuniani estremi	5
1.1.1 Clustering in argomento del perielio	5
1.1.2 Clustering in longitudine del nodo ascendente e longi- tudine del perielio	6
1.1.3 Bias	9
1.1.4 Risonanze orbitali	10
1.2 Orbite degli oggetti altamente inclinati e retrogradi	12
1.3 Inclinazione assiale del Sole	13
2 Ipotesi sul Pianeta Nove	17
2.1 Massa ed elementi orbitali	17
2.2 Posizione	18
2.2.1 Misure della sonda <i>Cassini</i>	19
2.3 Altre caratteristiche fisiche	19
2.4 Origine e formazione	21
2.4.1 Migrazione	23
2.4.2 Formazione <i>in situ</i>	24
2.4.3 Cattura	24
2.5 Evoluzione futura	24
2.5.1 Evoluzione del Pianeta Nove	24
2.5.2 Evoluzione degli oggetti trans-nettuniani	25
3 Metodologie di ricerca del Pianeta Nove	27
3.1 Survey passate e future	27
3.2 Occultazioni	28
3.3 Microlensing gravitazionale	29

4	Evidenze ed ipotesi su un decimo pianeta	31
4.1	Piano orbitale della Fascia di Kuiper	31
4.2	Caratteristiche e posizione	32
5	Conclusioni	35
	Bibliografia	36

Introduzione

Nel corso della storia dell'astronomia, l'osservazione di anomalie nelle orbite dei pianeti e dei corpi minori ha permesso di comprendere meglio le caratteristiche del nostro sistema solare. Il più grande esempio è la scoperta di Nettuno nel 1846 da parte dell'astronomo tedesco Johann Gottfried Galle in seguito alla previsione delle sue caratteristiche orbitali effettuate da Urbain Le Verrier studiando le anomalie nell'orbita di Urano. Già negli anni successivi fu ipotizzata la presenza di ulteriori corpi massicci a distanze ancora maggiori. Inizialmente Plutone, scoperto nel 1930, fu ritenuto il pianeta cercato, ma la sua importanza fu ridimensionata quando, con la scoperta di numerosissimi altri oggetti di piccola massa a distanze simili e anche maggiori, apparve chiaro che Plutone non era altro che uno dei tanti corpi che popolano la cosiddetta Fascia di Kuiper.

Lo studio di questa regione, e in generale degli oggetti trans-nettuniani, ha riaperto la questione dell'esistenza di un pianeta ad una distanza molto maggiore rispetto a Nettuno, il cui semiasse maggiore è $a = 30$ UA. In particolare gli oggetti più estremi dimostrano caratteristiche peculiari, come ad esempio valori simili in argomento del perielio e longitudine del nodo ascendente. Questo allineamento orbitale ha portato Trujillo & Sheppard (2014) e Batygin & Brown (2016a) a ipotizzare l'esistenza di un oggetto massivo, denominato Pianeta Nove, situato a centinaia di unità astronomiche dal Sole su un'orbita eccentrica ed inclinata, che potrebbe essere responsabile della perturbazione delle orbite degli oggetti trans-nettuniani. La stessa esistenza di oggetti con orbite estremamente ampie ed eccentriche quali Sedna e 2012 VP₁₁₃ non è possibile se non a causa di perturbazioni esterne, non implicabili ai pianeti già noti a causa dell'elevata distanza. Queste perturbazioni potrebbero essere dovute a stelle di passaggio vicino al sistema solare, sia al momento della sua formazione sia successivamente, o un altro corpo di massa planetaria presente attualmente o in passato nel sistema solare esterno (Brown & Batygin 2016).

L'ipotesi del Pianeta Nove è stata oggetto di numerosi studi negli ultimi anni, riguardanti i possibili indizi sulla sua esistenza, i suoi elementi orbitali,

le sue caratteristiche fisiche e la sua posizione attuale, restringendo il campo di ricerca soprattutto grazie all'estrapolazione dei dati presi dalla sonda *Cassini* (Fienga et al. 2016). Molti studi hanno riguardato l'origine del possibile nuovo pianeta, ipotizzando formazione *in situ*, migrazione da regioni più interne e cattura di un corpo inizialmente orbitante un'altra stella o già espulso precedentemente da un sistema planetario (Bromley & Kenyon 2016, Li & Adams 2016).

Il Pianeta Nove potrebbe anche spiegare l'esistenza di una popolazione di oggetti altamente inclinati e retrogradi (Batygin & Brown 2016a, 2016b) e l'inclinazione assiale del Sole (Bailey et al. 2016; Lai 2016), mentre altri autori hanno ipotizzato che l'inclinazione del piano orbitale della Fascia di Kuiper tra 40 e 42 UA possa essere dovuto ad un ulteriore corpo di massa planetaria ad una distanza inferiore a quella del Pianeta Nove (Volk & Malhotra 2017).

Capitolo 1

Evidenze dell'esistenza del Pianeta Nove

1.1 Orbite degli oggetti trans-nettuniani estremi

Con le scoperte di alcuni oggetti trans-nettuniani estremi negli ultimi anni sono emerse alcune peculiarità orbitali impreviste e potenzialmente incompatibili col modello classico di sistema solare con otto pianeti. Gli elementi principali di queste peculiarità riguardano l'allineamento orbitale di molti corpi minori distanti. Tutte le orbite di oggetti della Fascia di Kuiper con semiasse maggiore $a > 227$ UA raggiungono il perielio in un intervallo di 94° di longitudine, inoltre questi oggetti condividono lo stesso piano orbitale, inclinato di $22^\circ \pm 6^\circ$ rispetto all'eclittica. La probabilità che questi due fattori avvengano insieme per puro caso è del 0,007% (Batygin & Brown 2016a).

1.1.1 Clustering in argomento del perielio

Trujillo & Sheppard (2014) hanno notato che i più estremi oggetti trans-nettuniani noti, Sedna e 2012 VP₁₁₃, hanno valori simili di argomento del perielio ω , questa quantità rappresenta l'angolo tra la posizione del nodo ascendente, in cui l'orbita del corpo interseca il piano di riferimento, e il punto di perielio, misurato nella direzione del moto. La similarità nei valori dell'argomento del perielio non riguarda solo questi due oggetti, ma si estende a tutti i corpi noti con semiasse maggiore $a > 150$ UA e perielio superiore a quello di Nettuno $q > 30$ UA. Tutti questi oggetti presentano un valore di argomento del perielio $\omega \approx 340^\circ \pm 55^\circ$ e nessuno di questi ha $90^\circ < \omega < 270^\circ$.

Questo raggruppamento è sorprendente perché l'effetto della gravità dei

pianeti giganti dovrebbe rendere casuale questo parametro nel corso di miliardi di anni di evoluzione, ovvero l'argomento del perielio può rimanere raggruppato nel modo osservato solo se qualche meccanismo dinamico sta forzando questo clustering. Gli autori sopra citati ipotizzano che questo effetto sia causato dal meccanismo di Kozai, che può creare oggetti con $\omega \sim 0^\circ$ e $\omega \sim 180^\circ$ nelle prime fasi di evoluzione del sistema solare. Il meccanismo di Kozai prevede che un oggetto perturbato da un corpo massiccio subisca una librazione dell'argomento del pericentro, mentre variano notevolmente sia l'eccentricità e che l'inclinazione i del corpo minore. Questo avviene a causa della conservazione della componente del momento angolare orbitale del corpo minore parallela al momento angolare del corpo perturbatore, rimane così costante la quantità $L_z = \sqrt{1 - e^2} \cos i$. (Kozai 1962, Kinoshita & Nakai 2007).

Anche considerando questo effetto, al tempo attuale i valori di ω dovrebbero essere totalmente casuali a causa dell'effetto gravitazionale dei pianeti giganti. Inoltre gli oggetti trans-nettuniani estremi noti hanno, esclusi Sedna e 2012 VP₁₁₃, perielio $q < 50$ UA e risentono in minima parte della gravità di Giove, Saturno e Urano e solo quelli che hanno perielio di poco maggiore di $q = 30$ UA risentono della presenza di Nettuno. Questi corpi passano la maggior parte del tempo tra la regione dominata dalla gravità di Nettuno e quella dominata dalle maree galattiche ($a > 1500$ UA). Un corpo perturbatore massivo molto distante potrebbe restringere i valori dell'argomento del perielio all'intervallo osservato, facendo librare il valore di ω attorno a 0° tramite il meccanismo di Kozai, ma questo porterebbe anche ad una librazione attorno a valori di $\omega \sim 180^\circ$, dove l'unico oggetto osservato è 2013 FT₂₈ (Trujillo & Sheppard 2016).

Una spiegazione alternativa propone che il clustering in argomento del perielio sia dovuto a un disco massiccio di oggetti eccentrici della Fascia di Kuiper che porterebbe ad una instabilità che risulterebbe nelle orbite osservate. Questo modello prevede però una massa totale di $1 - 10m_T$ di materiale tra ~ 100 UA e ~ 10000 UA, massa molto maggiore di quella prevista dai modelli attuali (Madigan & McCourt 2015).

1.1.2 Clustering in longitudine del nodo ascendente e longitudine del perielio

Lo studio effettuato da Batygin & Brown (2016a) sugli oggetti che presentano clustering in argomento del perielio secondo Trujillo & Sheppard (2014) ha rivelato che molti dei corpi considerati potrebbero essere dinamicamente instabili a causa delle interazioni con Nettuno, specialmente quelli con pe-

CAPITOLO 1. EVIDENZE DELL'ESISTENZA DEL PIANETA NOVE 7

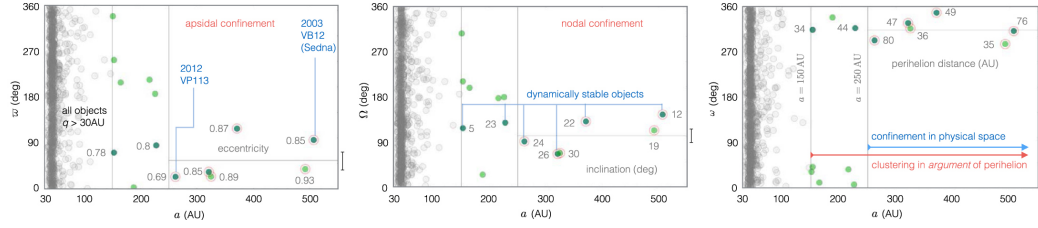


Figura 1: Orbite di oggetti della Fascia di Kuiper con $q > 30$ UA. I pannelli di sinistra, centro e destra rappresentano i valori di ϖ , Ω e ω in funzione del semiasse maggiore. L'argomento del perielio mostra un clustering per $a > 150$ UA, mentre gli altri parametri solo per $a > 250$ UA. Le linee orizzontali rappresentano i valori medi e le barre verticali segnano la deviazione standard dalla media (Batygin & Brown 2016a).

riello $30 \text{ UA} < q < 36 \text{ UA}$. Su tredici oggetti sono quindi stati considerati solo i sei ritenuti non essere influenzati da Nettuno (2012 VP₁₁₃, Sedna, 2010 GB₁₇₄, 2004 VN₁₁₂, 2000 CR₁₀₅ e 2010 VZ₉₈). Questi oggetti mostrano un raggruppamento con valore medio $\omega = 318^\circ \pm 8^\circ$, inconsistente col valore predetto dal meccanismo di Kozai. A questo punto gli autori notano che i sei corpi stabili considerati presentano un raggruppamento nei valori della longitudine del nodo ascendente (angolo tra il punto gamma e il nodo ascendente del corpo, misurato lungo l'eclittica e nello stesso senso della direzione del corpo) con valore medio $\Omega = 113^\circ \pm 13^\circ$. Analogamente la longitudine del perielio $\varpi = \omega + \Omega$ per questi oggetti mostra un clustering con valore medio $\varpi = 71^\circ \pm 16^\circ$. Il raggruppamento nei valori della longitudine del nodo ascendente e della longitudine del perielio implica che non solo gli oggetti distanti della Fascia di Kuiper attraversano l'eclittica in fasi simili della loro traiettoria, ma che le orbite sono fisicamente allineate.

Considerando solo gli oggetti con $q > 30$ UA e $a > 250$ UA (2012 VP₁₁₃, Sedna, 2010 GB₁₇₄, 2004 VN₁₁₂, 2013 RF₉₈ e 2007 TG₄₂₂) Batygin & Brown (2016a) notano che tutti questi hanno longitudine del perielio $20^\circ < \varpi < 120^\circ$ e raggiungono il perielio al di sotto dell'eclittica e sono quindi quasi coplanari. La probabilità che gli effetti di clustering in longitudine del perielio e in orientazione dell'orbita avvengano simultaneamente e casualmente è del 0,007%. L'allineamento orbitale osservato non è spiegabile né dal meccanismo di Kozai, né dall'instabilità causata da un disco massiccio di oggetti e perciò richiede un'altra spiegazione. Gli autori sopra citati propongono un pianeta massiccio, distante e posto su un'orbita eccentrica dimostrando che tale corpo può sostenere una popolazione di piccoli oggetti anti-allineati in apside.

Diciotto dei diciannove oggetti estremi in tabella 1 mostrano un raggrup-

Nome	q (UA)	a (UA)	e	i (deg)	ω (deg)	Ω (deg)	ϖ (deg)
2012 VP ₁₁₃	80,3	261	0,69	24,1	292,8	90,8	23,6
Sedna	76,0	499	0,85	11,9	311,5	144,5	96,0
2010 GB ₁₇₄	48,8	370	0,87	21,5	347,8	130,6	118,4
2014 SR ₃₄₉	47,6	290	0,84	18,0	341,2	34,9	16,1
2004 VN ₁₁₂	47,3	318	0,85	25,6	327,1	66,0	33,1
2000 CR ₁₀₅	44,3	226	0,80	22,7	317,2	128,3	85,5
2013 FT ₂₈	43,6	312	0,86	17,4	40,7	217,7	258,4
2013 GP ₁₃₆	41,1	153	0,73	33,5	42,2	210,7	252,9
2005 RH ₅₂	39,0	151	0,74	20,5	32,3	306,1	338,4
2003 HB ₅₇	38,1	165	0,77	15,5	10,9	197,8	208,7
2013 RF ₉₈	36,0	325	0,88	29,6	316,5	67,6	24,1
2007 TG ₄₂₂	35,6	482	0,93	18,6	285,8	112,9	38,7
2002 GB ₃₂	35,4	218	0,84	14,2	37,0	177,0	214,0
2007 VJ ₃₀₅	35,2	188	0,81	12,0	338,3	24,4	2,7
2013 UH ₁₅	35,0	174	0,79	26,1	282,9	176,5	99,4
2010 VZ ₉₈	34,3	152	0,77	4,5	313,9	117,4	71,3
2001 FP ₁₈₅	34,3	227	0,85	30,8	7,0	179,3	186,3
2013 FS ₂₈	34,1	199	0,83	13,1	102,0	204,6	306,6
2015 SO ₂₀	33,2	162	0,80	23,4	354,9	33,6	28,5

Tabella 1: Oggetti trans-nettuniani estremi, con $q > 30$ UA e $a > 150$ UA. Le quantità presenti in tabella sono perielio (q), semiasse maggiore (a), eccentricità (e), inclinazione (i), argomento del perielio (ω), longitudine del nodo ascendente (Ω) e longitudine del perielio (ϖ) (Trujillo & Sheppard 2016).

pamento in argomento del perielio tra $\omega \sim 290^\circ$ e $\omega \sim 40^\circ$. L'unico oggetto che non presenta un valore di ω in questo intervallo è 2013 FS₂₈ che, con un perielio $q \sim 34$ UA, risente di forti interazioni con Nettuno. Dodici dei diciannove oggetti presentano valori di longitudine del perielio tra $\varpi \sim 0^\circ$ e $\varpi \sim 130^\circ$, ma sono sette su otto considerando solo i corpi con $a > 250$ UA.

Dalla tabella 1 si può inoltre notare che gli oggetti con longitudine del perielio ϖ tra 0° e 120° hanno argomento del perielio ω tra 280° e 360° , mentre i corpi con $\varpi = 180^\circ - 330^\circ$ hanno $\omega = 0^\circ - 40^\circ$. Queste due popolazioni mostrano anche diverse orientazioni orbitali dato che il gruppo con $\omega = 280^\circ - 360^\circ$ raggiunge il perielio sotto l'eclittica, mentre il gruppo con $\omega = 0^\circ - 40^\circ$ lo raggiunge sopra l'eclittica. Questa correlazione è un'ulteriore evidenza della presenza del Pianeta Nove perché gli oggetti estremi ed eccentrici con perielio in regioni opposte del cielo si avvicinerebbero al pianeta

inclinato in punti opposti delle loro orbite. Quindi affinché questi oggetti rimangano distanti dal pianeta dovranno preferire latitudini eclittiche opposte a quelle del corpo perturbatore e quindi opposti valori dell'argomento del perielio (Trujillo & Sheppard 2016).

1.1.3 Bias

Le survey effettuate vicino all'eclittica rivelano più facilmente oggetti con argomento del perielio attorno a 0° o 180° , perché essendo al perielio e sull'eclittica sono più luminosi. Il clustering in argomento del perielio non può essere dovuto ad un bias osservativo perché tale bias sarebbe uguale per valori $\omega \sim 0^\circ$ e $\omega \sim 180^\circ$, ma tutti gli oggetti osservati, tranne uno, si trovano a $\omega \sim 0^\circ$. Inoltre, le survey che hanno scoperto gli oggetti interessati da questo clustering erano quasi sempre effettuate fuori dal piano dell'eclittica o su tutto il cielo. Il bias per le posizioni osservate è significativo solo per una latitudine eclittica di scoperta $|b| < 10$, il che è vero solo per metà degli oggetti considerati. Anche se questo bias fosse presente dovrebbe avere lo stesso effetto per $\omega \sim 0^\circ$ e $\omega \sim 180^\circ$, ma così non è. Quindi nessun bias osservativo spiega perché tutti gli oggetti con $q > 30$ UA e $a > 150$ UA presentano argomento del perielio $\omega \approx 340^\circ \pm 55^\circ$ e nessuno ha $90^\circ < \omega < 270^\circ$ (Trujillo & Sheppard 2014). Inoltre i sei oggetti che mostrano allineamento orbitale sono stati scoperti con sei diverse survey, ognuna con diversi bias non correlati tra loro (Batygin & Brown 2016a).

Utilizzando la Outer Solar System Origins Survey (OSSOS) del Canada-France-Hawaii Telescope, Shankman et al. (2017b) hanno effettuato una simulazione degli effetti dei bias osservativi sulla rilevazione di oggetti transnettuniani. Questa survey trova più facilmente oggetti con argomento del perielio $\omega \sim 0^\circ$ e $\omega \sim 180^\circ$, come già precedentemente notato da altri autori. OSSOS inoltre non può rilevare oggetti con longitudine del nodo ascendente $240^\circ < \Omega < 340^\circ$, dovendo evitare il piano galattico e l'inverno dell'emisfero settentrionale. La sensibilità nel rilevare oggetti a certi angoli di longitudine del perielio ϖ si trova combinando la sensibilità ai valori di ω e Ω . Si trova così una ridotta sensibilità per $110^\circ < \varpi < 160^\circ$. Questi bias non cambiano al variare dei valori di semiasse maggiore degli oggetti cercati.

OSSOS ha scoperto otti nuovi oggetti con $a > 150$ UA e $q > 30$ UA, tra questi quattro hanno $a > 250$ UA e $q > 38$ UA e quindi non risentono dell'influenza di Nettuno. Questi corpi non presentano particolare clustering in argomento del perielio, con tanti oggetti nel range di raggruppamento previsto quanti fuori da tale intervallo. Dei quattro oggetti con $a > 250$ UA, tre mostrano un allineamento in longitudine del nodo ascendente ai limiti del-

Nome	q (UA)	a (UA)	e	i (deg)	ω (deg)	Ω (deg)	ϖ (deg)
2013 SY ₉₉	50,0	735	0,93	4,2	32,2	29,5	61,7
2015 RX ₂₄₅	45,5	430	0,89	12,1	65,2	8,6	73,8
2013 UT ₁₅	43,9	200	0,78	10,7	252,1	192,0	84,1
2013 GP ₁₃₆	41,1	153	0,73	33,5	42,2	210,7	252,9
2015 KG ₁₆₃	40,5	680	0,94	14,0	32,1	219,1	251,2
2015 KH ₁₆₃	39,9	153	0,74	27,1	230,8	67,6	298,4
2015 GT ₅₀	38,4	312	0,88	8,8	129,0	46,1	175,1
2015 RY ₂₄₅	31,4	226	0,86	6,0	354,5	341,5	336,0

Tabella 2: Oggetti trans-nettuniani estremi, con $q > 30$ UA e $a > 150$ UA scoperti dalla survey OSSOS. I parametri indicati sono gli stessi della tabella precedente, nella quale compare anche 2013 GP₁₃₆ qui riportato (Shankman et al. 2017b).

l'intervallo di clustering già osservato. Più forte appare il raggruppamento nei valori della longitudine del perielio, due dei quattro oggetti con $a > 250$ UA cadono nell'intervallo di valori raggruppati, mentre uno appartiene al previsto gruppo con valori di ϖ a 180° dal clustering principale (Shankman et al. 2017b).

1.1.4 Risonanze orbitali

La forza di una risonanza orbitale con Nettuno decresce al crescere del semiasse maggiore di un oggetto, quindi gli alti valori di a degli oggetti trans-nettuniani estremi suggeriscono che questi non sono perturbati dalle risonanze provocate dal pianeta gigante. Questi oggetti potrebbero trovarsi in orbite che presentano risonanze orbitali con il Pianeta Nove, che potrebbero essere responsabili del raggruppamento in argomento del perielio in una configurazione anti-allineata con il nuovo pianeta. Le risonanze di moto medio (ovvero risonanze in cui il rapporto tra i periodi di rivoluzione di due corpi è dato da numeri interi) proteggono i corpi da incontri ravvicinati con oggetti massicci, che causerebbero una destabilizzazione dell'orbita.

A questo proposito Malhotra et al. (2016) hanno analizzato le orbite di sei oggetti con $a > 150$ UA e $q > 40$ UA (Sedna, 2010 GB₁₇₄, 2004 VN₁₁₂, 2012 VP₁₁₃, 2000 CR₁₀₅, 2013 GP₁₃₆). Ipotizzando che il rapporto tra il periodo orbitale del Pianeta Nove e quello di Sedna sia $P_9/P_{\text{Sedna}} = 3/2$, corrispondente ad un semiasse maggiore $a_9 = 665$ UA e periodo $P_9 = 17117$ anni, si trovano, come mostrato in figura 2, rapporti molto vicini a $5/2$ per

CAPITOLO 1. EVIDENZE DELL'ESISTENZA DEL PIANETA NOVE¹¹

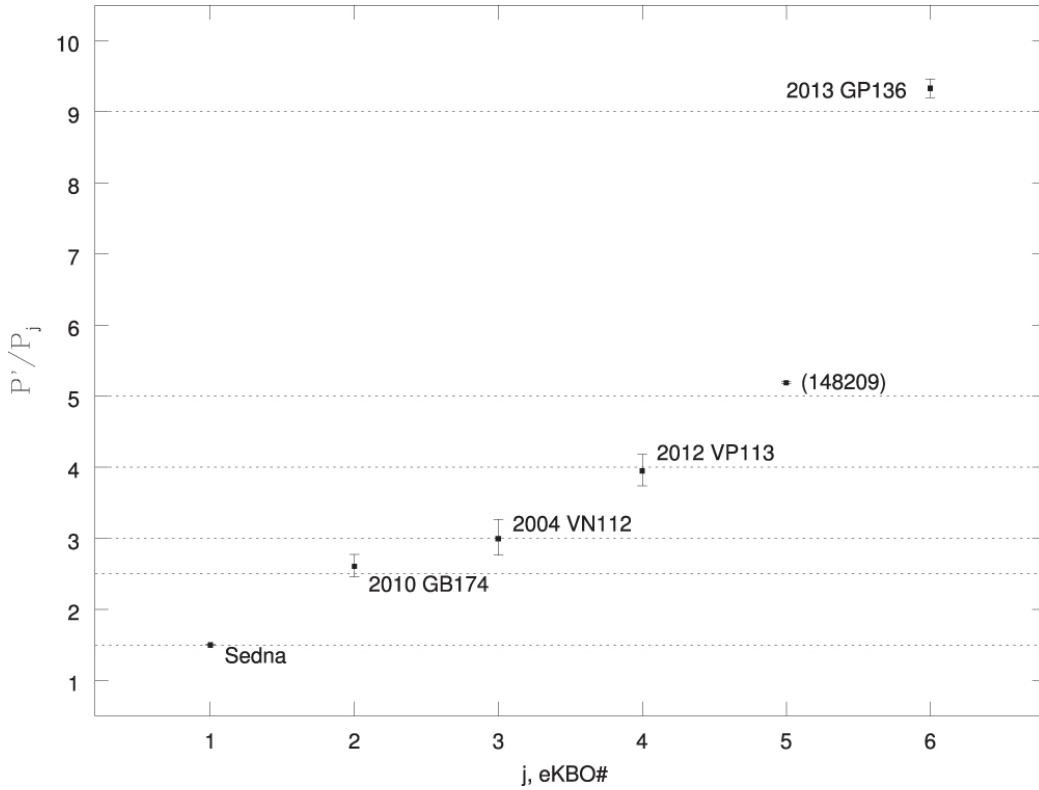


Figura 2: Rapporti tra i periodi orbitali di sei oggetti trans-nettuniani estremi e il Pianeta Nove, che viene assunto avere un periodo $3/2$ volte quello di Sedna, in funzione del numero $j = 1, \dots, 6$ usato dagli autori per identificare gli oggetti. Le linee orizzontali indicano i rapporti $3/2$, $5/2$, $3/1$, $4/1$, $5/1$, $9/1$. 2000 CR₁₀₅ è segnato in tabella con il suo numero di catalogo 148209 (Malhotra et al. 2016).

2010 GB₁₇₄, $3/1$ per 2004 VN₁₁₂, $4/1$ per 2012 VP₁₁₃, $5/1$ per 2000 CR₁₀₅, $9/1$ per 2013 GP₁₃₆. Un approfondimento di questa analisi è stato effettuato successivamente da Millholland & Laughlin (2017) sugli undici oggetti noti (presenti in tabella 1) con $a > 200$ UA e $q > 30$ UA, ottenendo che con un $a_9 = 654$ UA oltre ai valori già trovati dal lavoro precedente si aggiunge il rapporto $5/1$ per 2001 FP₁₈₅ e considerando valori interi maggiori di 2, altri corpi rientrano in risonanze con un Pianeta Nove nell'intervallo 653 UA $< a_9 < 663$ UA. Gli autori di entrambi gli studi concludono che se il Pianeta Nove con massa $m_9 = 10m_T$ ed eccentricità $e = 0,6$ esiste, ha semiasse maggiore $a_9 = 665$ UA o $a_9 = 654$ UA.

Nome	q (UA)	a (UA)	e	i (deg)	ω (deg)	Ω (deg)	ϖ (deg)
Niku	23,8	36	0,3	110	322,3	243,8	206,1
Drac	21,1	41	0,5	103	133,2	260,9	34,1
2016 NM ₅₆	10,5	74	0,9	144	345,6	350,0	335,6

Tabella 3: Parametri orbitali dei tre oggetti studiati da Batygin & Brown (2016b). I parametri indicati sono gli stessi delle tabelle 1 e 2

1.2 Orbite degli oggetti altamente inclinati e retrogradi

Cinque oggetti noti nel sistema solare esterno sono altamente inclinati, con $a > 200$ UA e $i > 50^\circ$ e tutti si trovano ai limiti delle regioni di raggruppamento orbitale previsto. Questi oggetti sono centauro con $8 \text{ UA} < q < 15$ UA. L'alta inclinazione di questi corpi implica che possono penetrare la regione dei pianeti giganti meno disturbati e mantenere il loro allineamento più facilmente rispetto ai centauro con bassa inclinazione. Secondo la simulazione di un sistema solare con un Pianeta Nove inclinato di $i_9 = 30^\circ$ effettuata da Brown & Batygin (2016), corpi con perielio a distanze minori si muovono verso i limiti delle regioni di clustering, allo stesso modo degli oggetti osservati.

Gli oggetti trans-nettuniani Drac (2008 KV₄₂) e Niku (2011 KT₁₉) presentano orbite quasi perpendicolari al piano orbitale degli altri corpi, mentre 2016 NM₅₆ occupa un'orbita retrograda relativamente vicina al piano del sistema solare. L'origine di questi oggetti non è spiegata dal modello di Nizza, il più accreditato modello di formazione ed evoluzione del sistema solare. Interazioni gravitazionali col Pianeta Nove potrebbero alterare eccentricità e inclinazione dei corpi della Fascia di Kuiper, generando una popolazione di centauro altamente inclinata ($i > 40^\circ$) e con grande semiasse maggiore ($a > 100$ UA), ma anche con semiasse maggiore $a < 100$ UA e con inclinazioni $i > 60^\circ$ (Batygin & Brown 2016b).

Utilizzando un modello di sistema solare con condizioni iniziali date dalle fasi finali del modello di Nizza, Batygin & Brown (2016b) hanno effettuato una simulazione di 3200 oggetti della Fascia di Kuiper, inizialmente distribuiti uniformemente in semiasse maggiore ($150 \text{ UA} < a < 550 \text{ UA}$) e perielio ($30 \text{ UA} < q < 50 \text{ UA}$), con una distribuzione gaussiana di inclinazione con valore medio $i = 0^\circ$ e deviazione standard $\sigma = 15^\circ$, inserendo il Pianeta Nove con parametri $m_9 = 10m_T$, $a_9 = 600$ UA, $e_9 = 0,5$, $i_9 = 30^\circ$ e $\omega_9 = 150^\circ$. Le orbite di Drac, Niku e 2016 NM₅₆ vengono correttamente replicate con que-

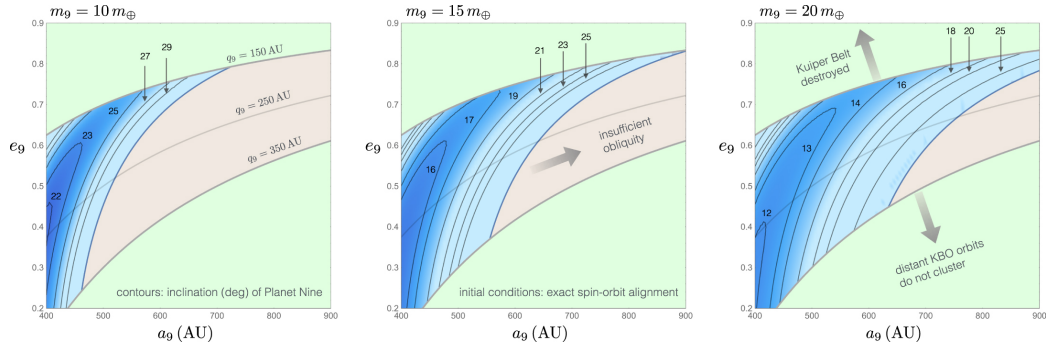


Figura 3: Parametri orbitali del Pianeta Nove in grado di produrre un'inclinazione dell'asse solare di $i_{\odot} = 6^{\circ}$ nel tempo di vita del sistema solare a partire da uno stato iniziale con $i_{\odot} = 0^{\circ}$. I contorni nello spazio $a_9 - e_9$ denotano i_9 , segnato in gradi. I pannelli di sinistra, centro e destra corrispondono rispettivamente a $m_9 = 10, 15, 20m_{\oplus}$ per il Pianeta Nove. Sono considerate solo le orbite con $150 \text{ UA} < q_9 < 350 \text{ UA}$ (Bailey et al. 2016).

sta simulazione, evolvendo da un'orbita iniziale con bassa inclinazione, alta eccentricità e $a > 300 \text{ UA}$. Shankman et al. (2017a) suggeriscono che una significativa popolazione di oggetti con basso perielio, alto semiasse maggiore e grandi valori di inclinazione, anche con oggetti retrogradi, sia una conseguenza della presenza del Pianeta Nove, ma ad oggi sono noti solo gli oggetti sopra citati.

1.3 Inclinazione assiale del Sole

L'asse di inclinazione del Sole è inclinato di sei gradi rispetto al piano invariabile del sistema solare (Souami & Souchay 2012), a differenza delle orbite planetarie, che sono tutte, escluso Mercurio, inclinate di meno di due gradi. Nei sistemi planetari che ospitano pianeti giganti vicini alla propria stella questo tipo di inclinazione è comune ma nel nostro sistema solare serve un altro meccanismo fisico per causare tale fenomeno. Ipotesi che sono state avanzate per spiegare questo effetto riguardano interazioni tra la magnetosfera del giovane Sole e il suo disco protostellare, un'asimmetria nella distribuzione di massa iniziale, un incontro ravvicinato con un'altra stella o la presenza di una stella compagna primordiale (Bailey et al. 2016).

Bailey et al. (2016) e Lai (2016) propongono che l'inclinazione assiale del Sole sia dovuta alla presenza di un pianeta massiccio situato su un'orbita distante ed inclinata, che con la sua influenza gravitazionale nel corso di 4,5 miliardi di anni può produrre una precessione dei vettori del momento

CAPITOLO 1. EVIDENZE DELL'ESISTENZA DEL PIANETA NOVE¹⁴

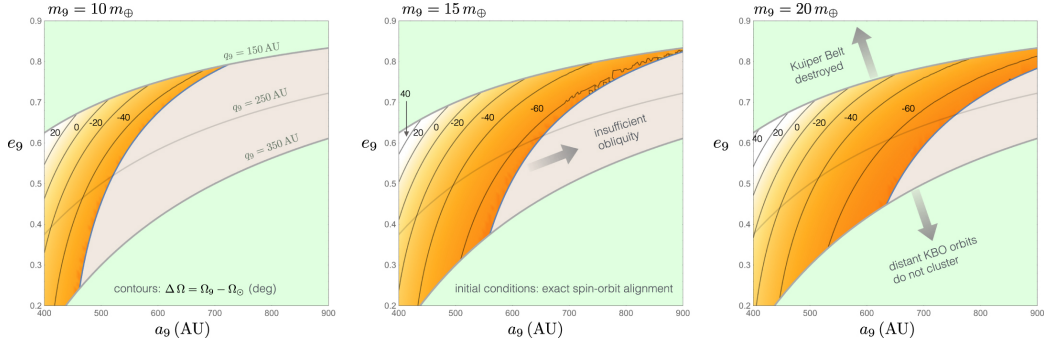


Figura 4: La figura è analoga alla figura 3 ma in questo caso i contorni rappresentano i valori della longitudine del nodo ascendente del Pianeta Nove relativo a quello del Sole, $\Delta\Omega$, segnato in gradi (Bailey et al. 2016).

angolare del Sole producendo un diverso allineamento della stella rispetto ai pianeti. Il modello testato da Bailey et al. (2016) prevede tre ipotetiche masse $m_9 = 10, 15, 20m_T$ per il Pianeta Nove, con un intervallo di perielio $150 \text{ UA} < q_9 < 350 \text{ UA}$ e di inclinazione orbitale $15^\circ < i_9 < 30^\circ$, calcolando le possibili combinazioni di a_9 , e_9 e i_9 per ogni m_9 che portano al valore osservato di $i_\odot = 6^\circ$. In particolare in un modello con $m_9 = 10m_T$, $a_9 = 700 \text{ UA}$, $e_9 = 0,6$, ovvero i parametri ipotizzati da Batygin & Brown (2016a), l'inclinazione solare ottenuta è di $i_\odot \sim 3^\circ - 5^\circ$.

Un'importante quantità, legata alla direzione del trasferimento di momento angolare nel sistema, è la longitudine del nodo ascendente del Sole che, misurata rispetto al piano invariabile del sistema solare, è $\Omega_\odot \sim 68^\circ$. La differenza con la stessa quantità calcolata per il Pianeta Nove, $\Delta\Omega = \Omega_9 - \Omega_\odot$, è significativa. L'intervallo ottenuto e mostrato in figura 4 è $\Delta\Omega \sim -60^\circ - 40^\circ$, con i valori positivi corrispondenti ad alte eccentricità e bassi valori del semi-asse maggiore. Ω_9 non è noto ma se il Pianeta Nove risiede sullo stesso piano orbitale degli oggetti più distanti della Fascia di Kuiper, che si raggruppano attorno a un valore della longitudine del nodo ascendente di $\Omega = 113^\circ \pm 13^\circ$, è probabile che $\Omega_9 \sim 113^\circ \pm 13^\circ$, questo implica che $\Delta\Omega \sim 45^\circ$. Con l'intervallo $\Omega_9 \sim 80^\circ - 120^\circ$ ipotizzato da Batygin & Brown (2016a) l'intervallo ottenuto è $12^\circ < \Delta\Omega < 52^\circ$. Con questi valori di $\Delta\Omega$ la figura 4 suggerisce $a_9 \lesssim 500 \text{ UA}$ e $e_9 \gtrsim 0,4$. Orbite di questo tipo, seppur non impossibili, potrebbero essere incompatibili con la struttura ipotizzata della Fascia di Kuiper distante, quindi Bailey et al. (2016) ipotizzano due soluzioni: o il Pianeta Nove non risiede sullo stesso piano orbitale degli oggetti distanti osservati o il modello adottato in cui il vettore di momento angolare primordiale del Sole coincide esattamente con quello del sistema solare è troppo restrittivo. Nonostante questa incertezza, Bailey et al. (2016) concludono

che per un range di masse e orbite consistenti con quelle teorizzate da Batygin & Brown (2016a), il Pianeta Nove può produrre l'inclinazione assiale osservata $i_{\odot} = 6^{\circ}$, dando credito all'ipotesi dell'esistenza di tale pianeta.

Capitolo 2

Ipotesi sul Pianeta Nove

2.1 Massa ed elementi orbitali

L'ipotesi iniziale del Pianeta Nove effettuata da Trujillo & Sheppard (2014) prevede una super-terra con $m_9 = 2 - 15m_T$ e $200 \text{ UA} < a_9 < 300 \text{ UA}$, tale corpo, secondo le simulazioni effettuate da questi autori, permette agli oggetti estremi Sedna e 2012 VP₁₁₃ di oscillare attorno al valore di argomento del pericentro $\omega \approx 0^\circ \pm 60^\circ$ per miliardi di anni.

La simulazione dell'effetto di un Pianeta Nove con massa $m_9 = 10m_T$ sugli oggetti trans-nettuniani estremi effettuata da Batygin & Brown (2016a) su un ampio range di semiasse maggiore $a_9 = 200 - 2000 \text{ UA}$ ed eccentricità $e_9 = 0,1 - 0,9$ rivela che il corpo perturbatore posto sullo stesso piano orbitale dei pianeti noti può produrre una popolazione di oggetti della Fascia di Kuiper anti-allineati in apside che sopravviva stabilmente per miliardi di anni per un significativo intervallo di parametri ($a \approx 400 - 1500 \text{ UA}$, $e \approx 0,5 - 0,8$). Con questa configurazione l'evoluzione orbitale degli oggetti trans-nettuniani varia significativamente se il semiasse maggiore di tali corpi è $a \gtrsim 250 \text{ UA}$ rispetto a orbite meno estreme. Questi corpi variano eccentricità e inclinazione raggiungendo anche orbite retrograde, portando al clustering orbitale osservato. Variando i valori della massa e ipotizzando un oggetto più piccolo, con $m_9 = 1m_T$ o $m_9 = 0,1m_T$ non vengono prodotti gli effetti attesi nel tempo di vita del sistema solare.

La popolazione osservata può essere riprodotta anche da un Pianeta Nove mediamente inclinato e altamente eccentrico, come provato dal modello con $a_9 = 700 \text{ UA}$, $e_9 = 0,6$, $m_9 = 10m_T$ e $i_9 = 30^\circ$. In questo caso vengono prodotti oggetti altamente inclinati e retrogradi, ma il clustering in longitudine del nodo ascendente Ω è evidente solo per oggetti con $a \gtrsim 500 \text{ UA}$, mentre il raggruppamento nei valori della longitudine del perielio $\varpi = \Omega + \omega$ appare

per corpi con $a \gtrsim 250$ UA. Questa discrepanza può essere indicativa di un Pianeta Nove più massiccio di quello modellato con $m_9 = 10m_T$. I valori del perielio dei centauro con alto semiasse maggiore permettono di escludere i valori di inclinazione orbitale del Pianeta Nove $i_9 = 90^\circ$ e $i_9 = 150^\circ$, che creano oggetti ad alta inclinazione ma con perielio che non presenta clustering. In generale simulazioni con valori di $i_9 = 60^\circ - 180^\circ$ non riescono a riprodurre esattamente i dati osservati. Né questo modello di Pianeta Nove inclinato né il precedente modello non inclinato riescono però a riprodurre il clustering in argomento del perielio attorno a $\omega \sim 0^\circ$ e la mancanza di oggetti con perielio $q = 50 - 70$ UA (Batygin & Brown 2016a).

Successive simulazioni effettuate da Brown & Batygin (2016) prevedono che un Pianeta Nove con $m_9 = 10m_T$ dovrebbe avere un semiasse maggiore nell'intervallo $a_9 = 500 - 800$ UA e un'eccentricità data dalla curva definita empiricamente $e_9 = 0,75 - (\frac{450\text{UA}}{a_9})^8$, con perielio $q_9 = 200 - 340$ UA, mentre se la massa fosse $m_9 = 20m_T$ il semiasse maggiore dovrebbe essere $a_9 = 800 - 1000$ UA e l'eccentricità data empiricamente da $e_9 = 0,75 - (\frac{650\text{UA}}{a_9})^8$. Il piano orbitale del pianeta è stimato avere un'inclinazione $22^\circ < i_9 < 40^\circ$, dove il valore minimo è dato dal valore medio dell'inclinazione orbitale degli oggetti trans-nettuniani estremi e il valore massimo è l'angolo oltre il quale la simulazione fallisce nel riprodurre il clustering osservato.

Le analisi delle risonanze orbitali di alcuni oggetti trans-nettuniani estremi esposte in sezione 1.1.4 hanno portato ad ipotizzare un valore di semiasse maggiore $a_9 = 665$ UA (Malhotra et al 2016) o $a_9 = 654$ UA (Millholland & Laughlin 2017) per un pianeta con massa $m_9 = 10m_T$ ed eccentricità $e_9 = 0,6$.

2.2 Posizione

Utilizzando i dati osservativi riguardanti gli oggetti trans-nettuniani che presentano un clustering in argomento del perielio e longitudine del perielio si può stimare la posizione attuale del Pianeta Nove. L'anti-allineamento orbitale dei corpi della Fascia di Kuiper implica un valore di argomento del perielio del corpo perturbatore $\omega_9 \sim 138^\circ$, a 180° dal valore medio osservato per gli oggetti estremi considerati. Allo stesso modo si può stimare il valore di $\varpi_9 \sim 251^\circ$, il che implica $\Omega_9 \sim 113^\circ$. Utilizzando un modello con $a_9 = 700$ UA, $e_9 = 0,6$, $m_9 = 10m_T$, $i_9 = 30^\circ$ e $\omega_9 = 150^\circ$ il clustering in argomento del perielio osservato viene riprodotto, mentre il raggruppamento dei valori di longitudine del nodo ascendente e longitudine del perielio appare solo per oggetti con $a \gtrsim 500$ UA e $a \gtrsim 250$ UA rispettivamente. Simulazioni

con diversi valori di ω_9 producono popolazioni differenti da quella osservata (Batygin & Brown 2016a).

2.2.1 Misure della sonda *Cassini*

Durante la sua esplorazione di Saturno, la sonda *Cassini* ha effettuato accurate osservazioni dell'orbita del pianeta gigante. Fienga et al. (2016) hanno utilizzato le effemeridi note ed inserito un Pianeta Nove con i parametri previsti da Batygin & Brown (2016a) $a_9 = 700$ UA, $e_9 = 0,6$, $m_9 = 10m_T$, $i_9 = 30^\circ$, $\omega_9 = 150^\circ$ e $\Omega_9 = 113^\circ$ e simulato l'effetto di tale corpo sull'orbita di Saturno al variare dell'anomalia vera ν_9 del Pianeta Nove (ovvero l'angolo tra il perielio e la posizione attuale del pianeta, misurato sul piano orbitale e nel verso di rivoluzione dell'oggetto). Se l'orbita del pianeta gigante devia dai valori osservati da *Cassini*, viene esclusa la possibilità che il nuovo pianeta si trovi attualmente in quella posizione. Il risultato della simulazione è che il Pianeta Nove non può esistere negli intervalli di anomalia vera $-130^\circ < \nu_9 < -100^\circ$ e $-65^\circ < \nu_9 < 85^\circ$. La posizione più probabile, ovvero quella in cui si ottiene la minore differenza tra le osservazioni e i risultati, derivata da questo metodo è $\nu_9 = 117,8^{+11}_{-10}^\circ$. Gli autori hanno utilizzato i dati ottenuti fino al 2014, senza specificare la precisione delle misure effettuate dalla sonda, e affermando che se la missione *Cassini* fosse continuata fino al 2020 si sarebbero potuti ottenere risultati migliori, escludendo con certezza i valori $132^\circ < \nu_9 < 106,5^\circ$. I valori che non sono stati esclusi e non rientrano nell'intervallo più probabile sono quelli in cui la presenza del Pianeta Nove non avrebbe un effetto misurabile sull'orbita di Saturno. Si può restringere la posizione attuale del Pianeta Nove all'intervallo di ascensione retta $5^\circ < \text{R.A.}_9 < 80^\circ$ e di declinazione $-35^\circ < \delta_9 < 5^\circ$. Questo esclude la regione in cui si trova il piano galattico $90^\circ < \text{R.A.} < 150^\circ$, nella quale sarebbe più difficile cercare un oggetto debole, distante e che si muove lentamente (Holman & Payne, 2016). Gli autori suggeriscono di cercare il Pianeta Nove intorno ai valori $\text{R.A.}_9=40^\circ$ e $\delta_9 = 15^\circ$, anche se il pianeta potrebbe attualmente trovarsi nella regione più vicina all'afelio visto che da una tale distanza le misure di *Cassini* non verrebbero influenzate (Sheppard 2017).

2.3 Altre caratteristiche fisiche

Linder & Mordasini (2016) ipotizzano un Pianeta Nove con massa $m_9 = 10m_T$ e semiasse maggiore $a_9 = 700$ UA, con un nucleo ferroso (50% ghiaccio d'acqua, 33,3% silicati, 16,7% ferro) circondato da un mantello di silicati,

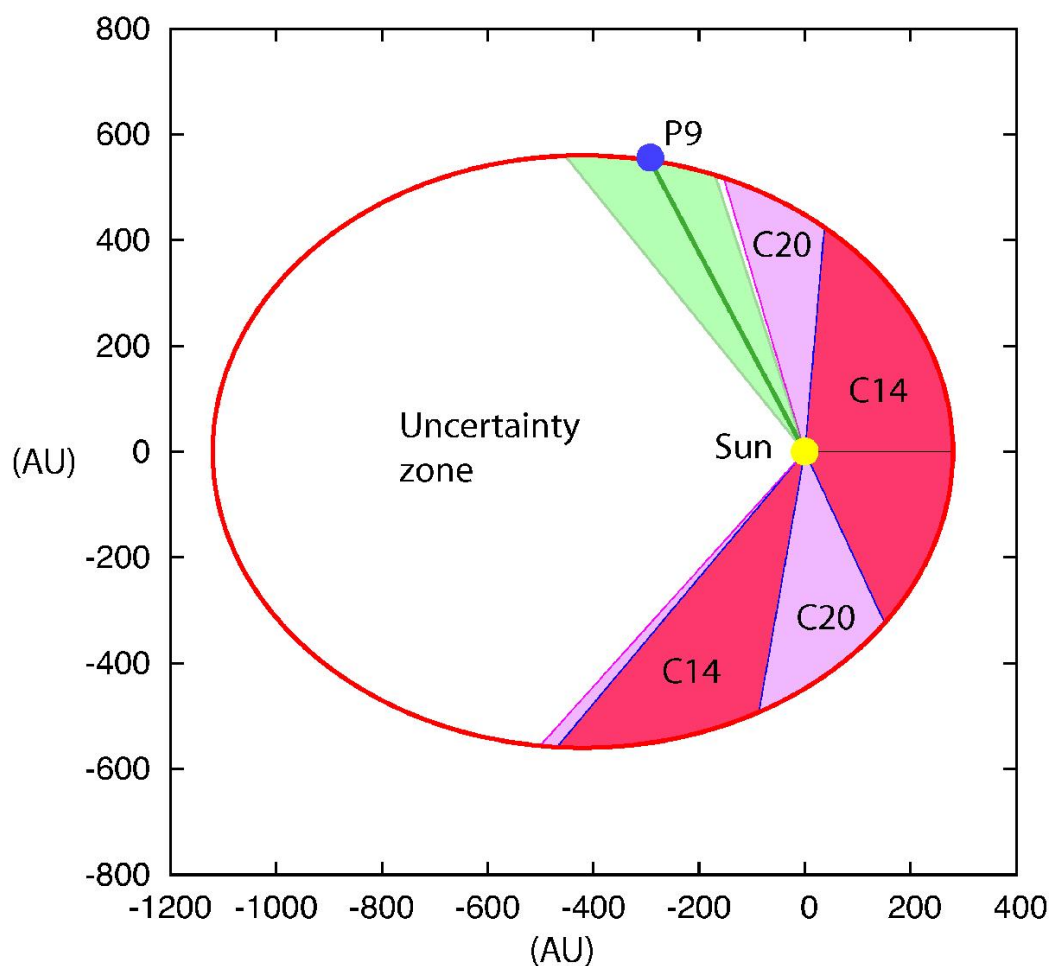


Figura 5: Possibili posizioni del Pianeta Nove. La regione in rosso (C14) è esclusa dalle analisi dei dati di *Cassini* fino al 2014. La zona rosa (C20) è la regione che si sarebbe potuta escludere con certezza avendo i dati di *Cassini* fino al 2020. La regione verde è la più probabile per il Pianeta Nove ($108^\circ < \nu_9 < 129^\circ$). La zona in bianco è la regione di incertezza, in cui l'effetto del Pianeta Nove è troppo piccolo per influenzare le misure di *Cassini* (Fienga et al. 2016).

uno strato di ghiaccio e un involucro di idrogeno ed elio di massa $m_{(\text{H}/\text{He})} = 1,4m_{\text{T}}$, con albedo di Bond 0,31 e albedo geometrica 0,41, valori simili a quelli di Nettuno. Con questo modello viene ottenuto un raggio di $3,66R_{\text{T}}$, ovvero 23300 km (leggermente più piccolo di Nettuno, il cui raggio è di $3,86R_{\text{T}}$) e una temperatura di 47 K, molto maggiore della temperatura di equilibrio a 700 UA, che è pari a 10 K. Tale temperatura risulterebbe in un picco di emissione di corpo nero a $62 \mu\text{m}$, e quindi sarebbe molto più luminoso nel lontano infrarosso piuttosto che nella banda ottica o del vicino infrarosso. Questo pianeta avrebbe una magnitudine apparente stimata $V = 21,7$, $R = 21,4$, $I = 21,0$, $Q = 10,7$. Nel caso di un Pianeta Nove più simile a Urano che a Nettuno, assumendo quindi albedo di Bond 0,30 e albedo geometrica 0,51, si ottengono valori simili, con $R_9 = 3,48R_{\text{T}}$ e $T_9 = 33 \text{ K}$, quindi una minore luminosità, con magnitudini $V = 22,0$ e $Q = 16,4$. Ipotizzando invece un pianeta roccioso con composizione simile a quella della Terra, il raggio risulta essere $R_9 = 1,9R_{\text{T}}$ e la temperatura $T_9 = 38 \text{ K}$, con magnitudini $V = 23,2$ e $Q = 15,2$. Un modello simile, e con risultati in accordo con i precedenti, è stato studiato da Fortney et al. (2016), posizionando il Pianeta Nove a 1000 UA, quindi con una temperatura di equilibrio di 9 K, e variando la massa tra $5m_{\text{T}}$ e $50m_{\text{T}}$, considerando diverse composizioni.

Come si vede in tabella 4, le dimensioni dell'involucro di idrogeno ed elio influenzano fortemente il raggio del pianeta, con valori che vanno da un minimo di $2,71R_{\text{T}}$ per una massa di $m_9 = 5m_{\text{T}}$, di cui solo $0,5m_{\text{T}}$ di involucro, a un massimo di $8,33R_{\text{T}}$ nel caso di $m_9 = 50m_{\text{T}}$ e $m_{(\text{H}/\text{He})} = 45m_{\text{T}}$. La temperatura varia tra $T_9 \sim 40 \text{ K}$ e $T_9 \sim 60 \text{ K}$, aumentando con la massa ma diminuendo all'aumentare della percentuale di massa dell'involucro. A queste temperature il metano non può rimanere allo stato gassoso e condensa, l'atmosfera risulta così radicalmente diversa da quella attesa per un pianeta simile a Nettuno, data la mancanza di questa importante fonte di opacità. A causa dello scattering di Rayleigh l'albedo di Bond stimata da questi autori è di 0,75.

2.4 Origine e formazione

La possibilità di un Pianeta Nove nel sistema solare esterno permette di testare le attuali teorie di formazione planetaria. Vari meccanismi possono porre un pianeta massiccio lontano dalla sua stella. Calcoli riguardanti la formazione dei pianeti gassosi dimostrano che questi puliscono le loro orbite spostando oggetti come super-terre ad elevate distanze. Se la densità del disco di gas protoplanetario a grandi distanze è piccola i pianeti vengono

m_9 (m_T)	m_n (m_T)	$m_{(H/He)}$ (m_T)	I/R	R_9 (R_T)	T_9 (K)
5	3	2	2/1	4,12	36,7
5	4,5	0,5	2/1	2,94	42,2
5	4,5	0,5	1/4	2,71	38,9
8	5	3	2/1	4,44	39,5
8	7	1	2/1	3,44	46,2
8	7	1	1/4	3,17	42,6
10	5	5	2/1	5,09	40,3
10	9	1	2/1	3,46	48,3
10	9	1	1/4	3,16	45,1
12	5	7	2/1	5,57	41,4
12	10	2	2/1	3,93	46,1
12	10	2	1/4	3,64	44,6
15	5	10	2/1	6,16	43,2
15	13	2	2/1	3,92	48,7
15	13	2	1/4	3,63	46,8
20	5	15	2/1	6,74	46,2
20	15	5	2/1	4,72	50,6
20	15	5	1/4	4,48	50,2
35	5	30	2/1	7,76	53,5
35	15	20	2/1	6,60	57,5
35	15	20	1/4	6,44	57,1
50	5	45	2/1	8,33	59,5
50	15	35	2/1	7,50	63,3
50	15	35	1/4	7,37	62,8

Tabella 4: Valori del raggio e della temperatura del Pianeta Nove al variare della massa e della composizione. I parametri segnati sono massa totale (m), massa del nucleo (m_n), massa dell'involucro ($m_{(H/He)}$), rapporto tra la quantità di ghiaccio d'acqua e la componente composta da ferro e silicati nel nucleo (Rapporto I/R, ice/rock), raggio (R_9) e temperatura (T_9) (Fortney et al. 2016).

espulsi dal sistema, mentre per densità maggiori l'orbita del pianeta viene circolarizzata se si trova a 100-200 UA dalla stella (Bromley & Kenyon 2016).

2.4.1 Migrazione

Ipotizzando che il Pianeta Nove si sia formato ad una distanza di perielio iniziale $q_{9,i} = 10$ UA e una massa nell'intervallo $m_9 = 1 - 50m_T$ sono possibili molte combinazioni finali di semiasse maggiore ed eccentricità dopo un'evoluzione determinata da un disco di gas con densità e massa variabile, grande estensione radiale e un'ampia cavità interna.

Nel caso di un disco protoplanetario poco massiccio, nel tempo di vita del sistema solare un pianeta può essere portato in un'orbita ampia e moderatamente eccentrica ma a bassa inclinazione, con semiasse maggiore che dipende dal raggio interno del disco a_{in} , i modelli che producono i parametri previsti per il Pianeta Nove prevedono $a_{in} \gtrsim 50$ UA. Masse più grandi o maggiori densità del disco portano ai risultati attesi in tempo minore. Con un disco protoplanetario massiccio oggetti con $m_9 > 10m_T$ producono le orbite previste per il Pianeta Nove, ma anche corpi con $m_9 = 5m_T$ possono portare agli stessi risultati nei dischi più massicci.

Una stella di passaggio, forse membro dell'ammasso in cui si è formato il Sole, può portare il Pianeta Nove nel sistema solare esterno. Se il pianeta si trova inizialmente su un'orbita circolare sul piano dell'eclittica, il passaggio di una stella può portare ad un'alta eccentricità ma aumenterebbe solo moderatamente la distanza di perielio e l'inclinazione del pianeta. Se il pianeta è già su un'orbita eccentrica al momento del passaggio della stella i risultati possibili sono molto più ampi.

Altri fattori che avrebbero potuto portare ad un'ampia migrazione del Pianeta Nove sono le maree galattiche e la gravità dell'ammasso in cui si è formato il Sole. Gli effetti delle maree galattiche sono deboli entro 10000 UA e oggetti con semiasse maggiore entro 1000 UA risentono minimamente di tale influenza. In assenza di gas le maree galattiche possono influenzare l'orbita del Pianeta Nove già migrato ad oltre 1000 UA, ma solo nel caso in cui questo abbia perielio $q_9 > 100$ UA ed eccentricità $e_9 = 0,8 - 0,9$, con inclinazione $i_9 = 0^\circ - 135^\circ$. Effetti gravitazionali dovuti all'ammasso di formazione del sistema solare possono aver avuto un'influenza maggiore rispetto alle maree galattiche, ma l'ammasso potrebbe essersi disperso in pochi milioni di anni. Se l'orbita del Pianeta Nove è stata influenzata da questi effetti, oltre ad un'alto perielio dovrebbe presentare anche un'alta inclinazione (Bromley & Kenyon 2016).

2.4.2 Formazione *in situ*

La formazione *in situ* del Pianeta Nove alle distanze proposte è estremamente difficile, a causa della minore quantità di materiale presente ad alte distanze dal Sole, ma è possibile quando l'evoluzione del disco protoplanetario produce un massiccio anello oltre 100 UA. Super-terre fino a distanze di 750 UA potrebbero nascere per coagulazione del materiale in 1-5 miliardi di anni, ma queste resterebbero su orbite quasi circolari. Quindi se il Pianeta Nove viene scoperto su un'orbita con bassa eccentricità e inclinazione è possibile che si sia formato *in situ*. Questa ipotesi di formazione resta comunque la meno probabile (Bromley & Kenyon 2016).

2.4.3 Cattura

È possibile che il Pianeta Nove si sia generato attorno ad un'altra stella e sia poi stato catturato dal Sole durante un incontro ravvicinato tra le due stelle. Questo evento di cattura può produrre orbite con ogni possibile valore di eccentricità e un ampio valore di semiasse maggiore, così che i parametri previsti per il Pianeta Nove possono essere ottenuti in molti modi. Nell'eventualità di questa cattura la Fascia di Kuiper verrebbe drasticamente alterata, con numerosi oggetti espulsi dal sistema solare. La probabilità che un pianeta venga catturato con successo e abbia dei parametri nell'intervallo previsto è però inferiore all'1% per ogni configurazione. Il caso più probabile (0,6%) prevede un'orbita molto larga attorno alla stella iniziale, con $a_9 = 200$ UA. Il problema della formazione del pianeta si sposta così alla stella iniziale ma non viene risolto, dato che è altamente improbabile che un pianeta si formi a tale distanza dalla sua stella. Il Pianeta Nove può anche essere stato un pianeta vagante catturato dopo essere già stato espulso dalla stella madre, l'evento è simile alla cattura da un'altra stella, ma meno probabile (0,2%) (Li & Adams, 2016).

2.5 Evoluzione futura

2.5.1 Evoluzione del Pianeta Nove

Quando il Sole lascerà la sequenza principale per diventare una gigante rossa la sopravvivenza dei pianeti terrestri sarà a rischio, mentre le conseguenze per i pianeti giganti saranno più lievi, limitandosi ad aumentare il loro semiasse maggiore, portando una forte instabilità nella Fascia di Kuiper e nella Nube di Oort. La presenza di uno o più ulteriori pianeti può portare ulteriore instabilità, con un aumento dell'eccentricità di questi corpi. Il

moto di un pianeta posto a centinaia o migliaia di unità astronomiche dalla sua stella può essere modificato da vari fattori, tra cui la perdita di massa della stella dopo la fase della sequenza principale, maree galattiche e incontri ravvicinati con altre stelle di passaggio. Quest'ultima opzione ha significativi effetti per corpi con $a > 10000$ UA, ma le conseguenze possono essere molteplici (perturbazione dell'orbita, collisione, espulsione, distruzione) e dipendono da velocità, direzione e massa della stella di passaggio. Non è però possibile prevedere con certezza quando un evento di questo tipo possa capitare nei dintorni del sistema solare.

L'effetto delle maree galattiche è più prevedibile. Queste tendono a cambiare l'eccentricità, l'inclinazione, l'argomento del perielio e la longitudine del nodo ascendente del pianeta, ma non il suo semiasse maggiore. Il piano del sistema solare è inclinato di circa 60° rispetto al piano galattico, questo valore è abbastanza grande da portare effetti significativi dovuti alle maree galattiche, ma non abbastanza da portare all'espulsione del pianeta.

La perdita di massa da parte del Sole costituirà la principale componente dell'evoluzione del sistema solare. Un pianeta distante allargherà la sua orbita, ma gli effetti dipendono dalla sua posizione, se il semiasse maggiore è abbastanza grande l'espulsione del pianeta dal sistema è possibile. Effettuando delle simulazioni combinando tutti i possibili effetti si trova che il sistema è più stabile per valori di semiasse maggiore del Pianeta Nove entro qualche migliaio di unità astronomiche e massa entro poche decine di masse terrestri, senza particolare dipendenza dal valore del perielio o dell'inclinazione (Veras 2016).

2.5.2 Evoluzione degli oggetti trans-nettuniani

Riguardo all'evoluzione degli oggetti trans-nettuniani sono possibili varie soluzioni: migrazione a diversi valori di semiasse maggiore, cattura o collisione in seguito ad un incontro ravvicinato con Nettuno o con il Pianeta Nove, collisione con il Sole, espulsione dal sistema solare e stabilità dinamica (Becker et al. 2017). Utilizzando i parametri di Batygin & Brown (2016a) $a_9 = 700$ UA, $e_9 = 0,6$, $m_9 = 10m_T$, $i_9 = 30^\circ$, $\omega_9 = 150^\circ$ e $\Omega_9 = 113^\circ$ e l'anomalia vera calcolata da Fienga et al. (2016) $\nu_9 = 117,8^\circ$, de la Fuente Marcos et al. (2016) hanno studiato l'evoluzione dei sei oggetti noti raggruppati in argomento del perielio (2012 VP₁₁₃, Sedna, 2010 GB₁₇₄, 2004 VN₁₁₂, 2013 RF₉₈ e 2007 TG₄₂₂) in presenza del Pianeta Nove. L'evoluzione orbitale futura di tale corpi appare più caotica rispetto al passato, suggerendo che gli oggetti trans-nettuniani estremi potrebbero essere una popolazione che sta transitando da orbite relativamente stabili ad orbite molto instabili. Le orbite più instabili risultano essere quelle di 2004 VN₁₁₂ e 2007 TG₄₂₂, che

ottengono delle eccentricità vicine ad 1, e di 2013 RF₉₈, il cui semiasse maggiore diventa molto piccolo. Effettuando varie realizzazioni dell'evoluzione futura di questi oggetti si ottengono orbite retrograde o l'espulsione dal sistema solare. Le orbite di Sedna e 2012 VP₁₁₃ appaiono essere le più stabili fra quelle studiate. Lo studio dell'evoluzione futura di questi oggetti rimane però difficile a causa del gran numero di incertezze non solo riguardanti l'eventuale presenza del Pianeta Nove, ma anche sulla loro orbita correntemente nota e sulle cause di perturbazione futura del loro moto, dato che non è possibile prevedere a lungo termine con certezza incontri ravvicinati con altre stelle e gli effetti delle maree galattiche.

Capitolo 3

Metodologie di ricerca del Pianeta Nove

3.1 Survey passate e future

La sonda *WISE* (Wide-field Infrared Survey Explorer) ha scansionato due volte l'intera volta celeste nelle bande W1 ($3,4 \mu\text{m}$) e W2 ($4,6 \mu\text{m}$) permettendo di escludere la presenza di pianeti della dimensione di Saturno, che emettono nell'infrarosso a causa del loro calore interno, entro ~ 28000 UA, e della dimensione di Giove entro ~ 82000 UA (Luhman, 2014), ma un pianeta di $\sim 10m_{\text{T}}$ non dovrebbe presentare questo tipo di emissione. La survey esclude anche la presenza di nane brune della dimensione di Giove entro ~ 26000 UA.

La Catalina Real-Time Transient Survey, effettuata in collaborazione da vari telescopi in Arizona e Australia, è completa fino a $V \sim 19,1$ nell'emisfero nord, e $V \sim 18,6$ nell'emisfero sud, nei casi ipotizzati con semiasse maggiore non troppo elevato e grande raggio, il Pianeta Nove sarebbe stato rilevato da questa survey, ma così non è stato. Il telescopio con specchio di diametro 1,8m Pan-STARRS 1, situato all'Haleakala Observatory alle Hawaii, ha scansionato più volte varie regioni di cielo con declinazioni $\delta > -30^\circ$. Questa survey, che lontano dal piano della Via Lattea è completa fino a magnitudine $r \sim 22,5$, esclude che il Pianeta Nove si trovi entro 45° dalla regione in cui è stato previsto il suo perielio, tranne i dintorni del piano galattico. La survey Pan-STARRS consisterà in futuro di quattro telescopi e permetterà di osservare oggetti molto più deboli (Brown & Batygin 2016).

Sheppard & Trujillo (2016) hanno effettuato una survey utilizzando la Dark Energy Camera situata al telescopio Blanco di 4m del Cerro Tololo Inter-American Observatory in Cile, insieme ad osservazioni con il telescopio

Subaru di 8,2m alle Hawaii, con i telescopi Magellan (due telescopi da 6,5m) a Las Campanas in Cile e il telescopio Mayall di 4m al Kitt Peak National Observatory in Arizona. In totale 1080 gradi quadrati di cielo sono stati scansionati fino a $r \sim 24$, rimanendo a 15° di distanza dal piano galattico. Questa survey ha permesso di scoprire vari oggetti trans-nettuniani estremi, tra cui 2012 VP₁₁₃, simile a Sedna, e altri oggetti che presentano un clustering in argomento del perielio (tra cui il primo oggetto della prevista popolazione con un perielio a 180° dal clustering principale, 2013 FT₂₈) e longitudine del nodo ascendente, permettendo così di rafforzare le ipotesi sull'esistenza del Pianeta Nove anche se questo non è stato direttamente rilevato dalla survey. Gli autori calcolano che la survey effettuata non riuscirebbe a trovare il pianeta previsto con $a_9 = 700$ UA, $e_9 = 0,6$, $m_9 = 10m_T$ e $i_9 = 30^\circ$ il 99% delle volte visto che a causa dell'alta eccentricità questo passerebbe la maggior parte del tempo vicino all'afelio, dove sarebbe troppo debole per essere rilevato, con una magnitudine inferiore a $r \sim 24$.

La Dark Energy Survey effettuata con la Dark Energy Camera al Cerro Tololo Inter-American Observatory in Cile sta eseguendo la più profonda scansione del cielo nell'emisfero sud, con una magnitudine limite di $r \sim 23,8$ il Pianeta Nove dovrebbe essere rilevato se si trova nell'area osservata. Questa scansione dovrebbe essere completata nel 2018. Il Large Synoptic Survey Telescope, che dovrebbe essere operativo dal 2023, effettuerà profonde survey di tutto il cielo visibile dalla sua posizione al Cerro Pachón in Cile fino alla magnitudine $r \sim 24,5$ (Brown & Batygin 2016).

Tre parametri sono fondamentali riguardo alla possibilità di trovare il Pianeta Nove: massa, albedo e distanza. Se il pianeta fosse molto massiccio, con alta albedo e non troppo distante sarebbe già stato rilevato. Se invece è piccolo, scuro e distante potrebbe non essere visibile nemmeno con i più grandi telescopi. Più probabilmente i valori di questi parametri stanno nel mezzo e il Pianeta Nove ha magnitudine tra $r \sim 23$ e $r \sim 25$, debole ma osservabile con le survey future e i nuovi telescopi (Sheppard 2017).

3.2 Occultazioni

Schneider (2017) propone di cercare il Pianeta Nove tramite le occultazioni di stelle che può produrre muovendosi nel cielo. Ad una distanza di 1000 UA il nuovo pianeta con $R_9 = 3R_T$ avrebbe un diametro angolare $\delta_9 \sim 40$ mas, che gli permetterebbe di occultare la maggior parte delle stelle di campo, che hanno tutte $\delta_* \leq 57$ mas. Durante un'occultazione il flusso totale di stella e pianeta si ridurrebbe a quello del solo pianeta se le dimensioni angolari permettono al Pianeta Nove di far scomparire totalmente la stella

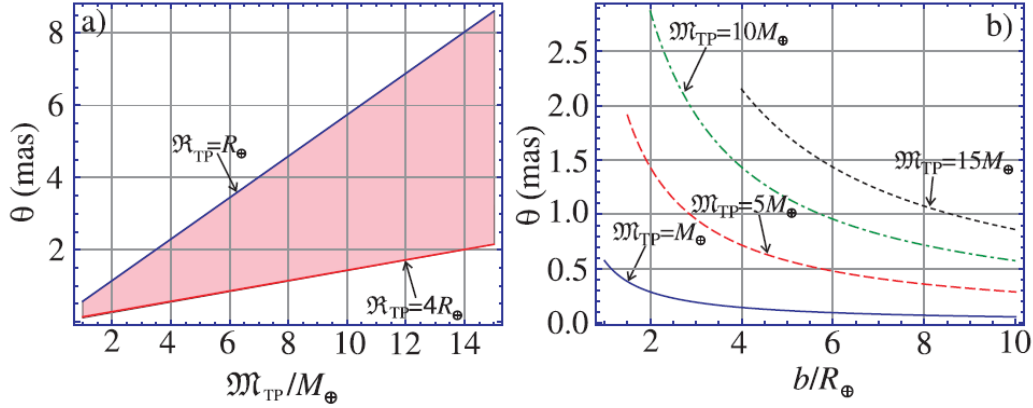


Figura 6: Curve dell'angolo di diffusione di un raggio di luce nel campo gravitazionale di un pianeta trans-nettuniano in funzione della massa in unità di masse terrestri per due valori limite del raggio ($1R_T$ e $4R_T$) e in funzione del parametro di impatto b in unità di raggi terrestri (Philippov & Chobanu 2016).

dietro di sé. Ipotizzando sempre una distanza di 1000 UA, la velocità orbitale v_9 del Pianeta Nove è di circa 1 km/s, il che dà un moto apparente di 70 arcsec/yr, molto maggiore di quello delle stelle, inferiore a 10 arcsec/yr. Data la velocità orbitale della terra $v_T = 30$ km/s la durata dell'occultazione sarà $D_{occ} = \frac{2R_9}{30\text{km/s}\cos\alpha_T}$ se il percorso della stella è lungo l'equatore del pianeta. α_T è l'angolo tra la linea di vista del Pianeta Nove e il vettore della velocità orbitale della Terra al momento dell'occultazione. La probabilità che avvenga una occultazione di una stella di magnitudine $V=21$ entro un periodo di sei mesi è però solo del $5 \times 10^{-6}\%$, e per avere una probabilità del 10% bisogna considerare stelle fino alla magnitudine $V=32$, che saranno osservabili con i futuri telescopi della classe 30m. Inoltre, un'occultazione osservata con tali telescopi permetterebbe di studiare l'atmosfera e rilevare possibili anelli e satelliti del Pianeta Nove.

3.3 Microlensing gravitazionale

Philippov & Chobanu (2016) propongono un metodo di ricerca alternativo, che utilizza l'effetto del lensing gravitazionale, che causa una deviazione della luce di una stella lontana a causa di un oggetto massivo che agisce come lente, formando più immagini dello stesso oggetto. Se queste immagini possono essere risolte si parla di strong lensing, altrimenti viene chiamato microlensing. In quest'ultimo caso l'effetto del campo gravitazionale del corpo

CAPITOLO 3. METODOLOGIE DI RICERCA DEL PIANETA NOVE30

sulla luce della stella è un aumento della luminosità di tale stella. Utilizzando la teoria del microlensing gravitazionale, gli autori calcolano il raggio di Schwarzschild del corpo $R_{\text{Sch}} = \frac{2Gm_9}{c^2}$ e utilizzano il parametro di impatto b (distanza perpendicolare tra la traiettoria del fotone e il centro della lente) per stimare l'angolo di deviazione della luce in arcsec $\theta = \frac{2R_{\text{Sch}}}{b} 206265''$ per un intervallo di masse $1m_{\text{T}} < m_9 < 15m_{\text{T}}$.

Le curve in figura 6 mostrano la dipendenza dell'angolo di diffusione dalla massa del pianeta e dal parametro di impatto b in quattro casi: pianeta terrestre con $m_9 = 1m_{\text{T}}$, $R_9 = 1R_{\text{T}}$; super-terra con $m_9 = 5m_{\text{T}}$, $R_9 = 1,5R_{\text{T}}$; super-terra con $m_9 = 10m_{\text{T}}$, $R_9 = 2R_{\text{T}}$; pianeta simile a Nettuno con $m_9 = 15m_{\text{T}}$ e $R_9 = 4R_{\text{T}}$. In ognuno dei quattro casi l'angolo di diffusione misurato è $\theta < 2,9$ mas, inferiore alla risoluzione angolare del JWST (James Webb Space Telescope), che è $\beta_{\text{JWST}} = 18$ mas, e dell'E-ELT (European Extremely Large Telescope), $\beta_{\text{E-ELT}} = 3$ mas. Non sarà dunque possibile misurare sperimentalmente questo effetto nel prossimo futuro.

Capitolo 4

Evidenze ed ipotesi su un decimo pianeta

4.1 Piano orbitale della Fascia di Kuiper

Negli ultimi due decenni le numerose scoperte effettuate nel sistema solare esterno hanno rivelato caratteristiche dinamiche complesse. Per quanto riguarda il piano orbitale medio della Fascia di Kuiper si può supporre che questo sia vicino al piano invariabile, normale al momento angolare orbitale totale del sistema solare. Questo piano è stato determinato con una precisione di meno di 1 mas utilizzando i corpi noti (Souami & Souchay 2012). Ulteriori oggetti presenti nel sistema solare esterno modificherebbero il valore del piano invariabile, specialmente se posti in orbite inclinate. Misure accurate del piano medio della Fascia di Kuiper possono essere una prova della presenza di corpi massicci situati nel sistema solare esterno.

Per oggetti con semiasse maggiore $a \gg 40$ UA il piano medio atteso si avvicina asintoticamente al piano invariabile, che ha inclinazione $i_0 = 1,6^\circ$ e longitudine del nodo ascendente $\Omega_0 = 107,6^\circ$ (Souami & Souchay 2012), con una deviazione significativa attorno ad $a = 40,3$ UA causata dalla risonanza secolare nodale ν_{18} , legata alla precessione dei nodi tra un corpo minore e Nettuno (Chiang & Choi 2008).

Considerando gli oggetti della Fascia di Kuiper non risonanti in un intervallo di semiasse maggiore tra 42 UA e 48 UA, il piano orbitale è mediamente inclinato di $i_m = 1,8^{+0,7}_{-0,4}^\circ$ con longitudine del nodo ascendente $\Omega_m = 77^{+18}_{-14}^\circ$, in accordo con quanto previsto dalla teoria degli effetti secolari dei pianeti noti. Nella regione tra 40,3 UA e 42 UA viene invece rilevata una significativa deviazione rispetto al piano orbitale medio. La teoria prevede una deviazione in questa regione a causa della risonanza ν_{18} , ma l'inclinazione misurata è

di $\sim 13^\circ$ rispetto al piano previsto, una discrepanza di circa 3σ . È possibile che questa differenza derivi da effetti secolari di ordine elevato oppure che la risonanza ν_{18} si trovi in una posizione leggermente diversa da quella prevista a causa dell'effetto di oggetti massicci non attualmente noti.

Per oggetti della Fascia di Kuiper più distanti, tra 50 UA e 80 UA, il piano atteso è vicino al piano invariabile, mentre il piano misurato presenta un'inclinazione di $i_m = 9,1^{+6,6}_{-3,8}^\circ$ e longitudine del nodo ascendente $\Omega_m = 227^{+18}_{-44}^\circ$, mentre considerando oggetti tra 50 UA e 150 UA si ottengono $i_m = 6,8^{+5,6}_{-3,2}^\circ$ e $\Omega_m = 222^{+41}_{-32}^\circ$. Questi valori sono molto differenti dai valori attesi di $i_0 = 1,6^\circ$ e $\Omega_0 = 107^\circ$ per oggetti nelle regioni considerate. Questa deviazione, come quella tra 40,3 UA e 42 UA, potrebbe essere causata da un oggetto di massa planetaria situato nel sistema solare esterno con un semiasse maggiore $a \lesssim 100$ UA. Un'altra spiegazione potrebbe essere l'effetto gravitazionale degli oggetti della Fascia di Kuiper tra di loro, ma questo richiederebbe un disco molto più massiccio di quello attualmente stimato (Volk & Malhotra 2017).

4.2 Caratteristiche e posizione

La presenza del Pianeta Nove con una massa $m_9 = 10m_T$ e un semiasse maggiore $a_9 = 600$ UA non spiegherebbe né la deviazione osservata tra 40,3 UA e 42 UA né quella osservata tra 50 UA e 150 UA, anche se posto in un'orbita molto inclinata. Un oggetto molto più vicino al Sole è richiesto per spiegare questi effetti.

La figura 7 illustra delle combinazioni di massa, semiasse maggiore e inclinazione che possono produrre una deviazione del piano orbitale medio ad $a = 65$ UA come quella osservata. Ad esempio, un oggetto delle dimensioni di Marte ($\sim 0,1m_T$) con un semiasse maggiore tra 65 UA e 80 UA su un'orbita sufficientemente inclinata può produrre le deviazioni osservate. Assumendo una albedo di 0,5 (simile a quella dei pianeti nani della Fascia di Kuiper) e densità $\rho = 2 - 5,5 \frac{g}{cm^3}$ (densità tipiche di corpi rocciosi dai pianeti nani ai pianeti terrestri) un oggetto di $\sim 0,1m_T$ avrebbe una magnitudine apparente $V \sim 17$. Non è impossibile che un corpo con tale magnitudine non sia ancora stato osservato, specialmente se si trova in regioni ad alte latitudini eclittiche. La popolazione di oggetti osservati tra 50 UA e 150 UA pone dei limiti alla massa che può avere un pianeta in questa regione senza spazzare via i corpi minori, questa massa massima è di $\sim 2,4m_T$ (Volk & Malhotra 2017).

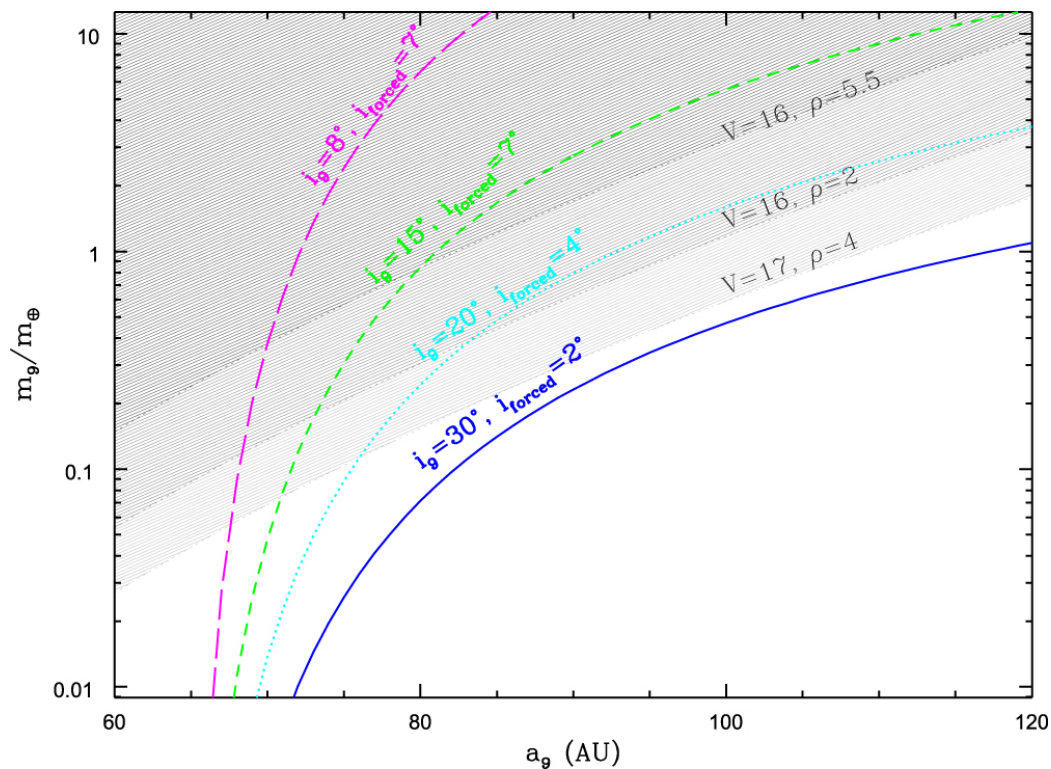


Figura 7: Le curve colorate indicano combinazioni di massa e semiasse maggiore per un ipotetico pianeta, qui indicato come Pianeta Nove, con l'inclinazione orbitale segnata i_9 che produrrebbe l'inclinazione forzata i_{forced} del piano a 65 UA. Le zone in ombra indicano regioni in cui il pianeta sarebbe più brillante delle magnitudini indicate, assumendo una albedo di 0,5 e la densità segnata. Le inclinazioni sono relative al piano invariabile del sistema solare (Volk & Malhotra 2017).

Capitolo 5

Conclusioni

Al momento l'allineamento orbitale osservato negli oggetti trans-nettuniani estremi rimane senza spiegazione. La presenza di un corpo massiccio ($m_9 \sim 5 - 20m_T$), distante ($a_9 \sim 350 - 1000$ UA), inclinato ($i_9 \sim 22^\circ - 40^\circ$) ed eccentrico ($e_9 \sim 0,5 - 0,8$), con argomento del perielio $\omega_9 \sim 138^\circ$, longitudine del perielio $\varpi_9 \sim 251^\circ$ e longitudine del nodo ascendente $\Omega_9 \sim 113^\circ$ denominato Pianeta Nove e proposto da molti autori, potrebbe spiegare i dati ricavati dalle osservazioni. Oltre all'allineamento orbitale dei più distanti oggetti della Fascia di Kuiper, la presenza di un massiccio corpo perturbatore nel sistema solare esterno spiega altre numerose peculiarità osservate negli oggetti più lontani noti come l'inclinazione assiale del Sole, l'esistenza e l'allineamento di oggetti con alto perielio come Sedna, la presenza di centauri con alti valori di semiasse maggiore e di oggetti altamente inclinati e retrogradi mentre il clustering in argomento del perielio non è totalmente spiegato dai modelli che prevedono il Pianeta Nove. Riguardo alla posizione attuale del pianeta, le misure della sonda *Cassini* hanno permesso di escludere alcuni intervalli di anomalia vera, indicando un possibile valore di $\nu_9 = 117,8^{+11}_{-10}^\circ$, ma per un ampio intervallo non è possibile né escludere né ipotizzare la presenza del pianeta. Il Pianeta Nove potrebbe dunque trovarsi in questa regione, vicino all'afelio della sua orbita.

Rimane problematica la questione dell'origine di tale pianeta, dato che la formazione *in situ* è altamente improbabile, così come la cattura da un'altra stella o di un pianeta vagante. Difficile, ma più probabile delle precedenti, è l'ipotesi che il pianeta si sia formato nella regione dei pianeti giganti o della Fascia di Kuiper e sia poi migrato in un'orbita molto ampia a causa di interazioni gravitazionali, forse con una stella di passaggio. Il futuro del Pianeta Nove, nel caso in cui esista, è altrettanto incerto. Il suo moto può essere influenzato da numerosi fattori e questo rende altamente difficile prevedere l'evoluzione di tale corpo o degli oggetti trans-nettuniani che subiscono la

sua influenza.

Oltre al cosiddetto Pianeta Nove, è stato proposto che un altro oggetto massiccio si trovi nel sistema solare esterno, ma ad una distanza minore del pianeta già ipotizzato. Questo oggetto spiegherebbe l'anomala inclinazione del piano orbitale in alcune regioni della Fascia di Kuiper, ma i problemi riguardanti la sua mancata scoperta e la sua possibile origine sono gli stessi già presentati per il Pianeta Nove.

La validità delle simulazioni effettuate è limitata dal piccolo numero di oggetti distanti noti, quindi è fondamentale effettuare nuove scoperte di oggetti trans-nettuniani, così da poter restringere ulteriormente il campo di ricerca del Pianeta Nove e provare o escludere la sua esistenza. La ricerca potrà avvenire in futuro effettuando survey sempre più profonde utilizzando telescopi di nuova generazione.

Bibliografia

- Bailey, E., Batygin, K., Brown, M. E. 2016, *Solar obliquity induced by Planet Nine*, AJ, 152, 126
- Batygin, K. & Brown, M. E. 2016a, *Evidence for a distant giant planet in the solar system*, AJ, 151, 22
- Batygin, K. & Brown, M. E. 2016b, *Generation of highly inclined trans-neptunian objects by Planet Nine*, ApJL, 833, L3
- Becker, J. C., Adams, F. C., Khain, T., Hamilton, S. J., Gerdes, D. 2017, *Evaluating the dynamical stability of outer solar system objects in the presence of Planet Nine*, AJ, 154, 2
- Bromley, B. C. & Kenyon, S. J. 2016, *Making Planet Nine: a scattered giant in the outer solar system*, ApJ, 826, 64
- Brown, M. E. & Batygin, K. 2016, *Observational constraints on the orbit and location of Planet Nine in the outer solar system*, ApJL, 824, L23
- Chiang, E. & Choi, H. 2008, *The warped plane of the classical Kuiper Belt*, AJ, 136, 350
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Aarseth, S. J. 2016, *Dynamical impact of Planet Nine scenario: N-body experiments*, MNRASL, 460, L123
- Fienga, A., Laskar, J., Manche, H., Gastineau, M. 2016, *Constraints on the location of a possible 9th planet derived from the Cassini data*, A&A, 587, L8
- Fortney, J. J., Marley, M. S., Laughlin, G., Nettelmann, N., Morley, C. V., Lupu, R. E., Visscher, C., Jeremic, P., Khadder, W. G., Hargrave, M. 2016, *The hunt for Planet Nine: atmosphere, spectra, evolution and detectability*, ApJL, 824, L25
- Holman, M. J. & Payne, M. J. 2016, *Observational constraints on Planet Nine: Cassini range observations*, AJ, 152, 94
- Kinoshita, H., Nakai, H. 2007, *General solution of the Kozai mechanism*, CMDA, 98, 67
- Kozai, Y. 1962, *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity*, AJ, 67, 591

- Lai, D. 2016, *Solar obliquity induced by Planet Nine: simple calculation*, AJ, 152, 215
- Li, G. & Adams, F. C. 2016, *Interaction cross sections and survival rates for proposed solar system member Planet Nine*, ApJL, 823, L3
- Linder, E. & Mordasini, C. *Evolution and magnitudes of candidate Planet Nine*, 2016, A&A, 589, A134
- Luhman, K. L. 2014, *A search for a distant companion to the Sun with the Wide-Field Infrared Survey Explorer*, ApJ, 781, 4
- Madigan, A.-M. & McCourt, M. 2015, *A new inclination instability reshapes Keplerian disks into cones: application to the outer solar system*, ArXiv e-prints, arXiv:1509.08920
- Malhotra, R., Volk, K., Wang, X. 2016, *Corralling a distant planet with extreme resonant Kuiper Belt objects*, ApJL, 824, L22
- Millholland, S. & Laughlin, G. 2017, *Constraints on Planet Nine's orbit and sky position within a framework of mean-motion resonances*, AJ, 153, 91
- Philippov, J. P. & Chobanu, M. I. 2016, *Nemesis, Tyche, Planet Nine Hypotheses. I. Can we detect the bodies using gravitational lensing?*, PASA, 33, 1
- Schneider, J. 2017, *Measuring the radius and mass of Planet Nine*, ArXiv e-prints, arXiv:1703.09519v2
- Shankman, C., Kavelaars, J. J., Lawler, S. M., Gladman, B. J., Bannister, M. T. 2017a, *Consequences of a distant massive planet on the large semi-major axis trans-neptunian objects*, AJ, 153, 63
- Shankman, C., Kavelaars, J. J., Bannister, M. T., Gladman, B. J., Lawler, S. M., Chen, Y.-T., Jakubik, M., Kaib, N., Alexandersen, M., Gwyn, S. D. J., Petit, J.-M., Volk, K. 2017b, *OSSOS VI. Striking biases in the detection of large semimajor axis trans-neptunian objects*, AJ, 154, 50
- Sheppard, S. S. & Trujillo, C. A. 2016, *New extreme trans-neptunian objects: toward a super-earth in the outer solar system*, AJ, 152, 221
- Sheppard, S. S. *The Hunt for Planet X*, Sky & Telescope, ottobre 2017
- Souami, D. & Souchay, J. 2012, *The solar system's invariable plane*, A&A, 543, A133
- Trujillo, C. A. & Sheppard, S. S. 2014, *A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units*, Nature, 507, 471
- Veras, D. 2016, *The fates of solar system analogues with one additional distant planet*, MNRAS, 463, 2958
- Volk, K. & Malhotra, R. 2017, *The curiously warped mean plane of the Kuiper Belt*, AJ, 154, 62