



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

STUDIO SPETTROSCOPICO DEL POTENTIALLY HAZARDOUS
ASTEROID (99942) APOPHIS NELL'AMBITO DEL PROGETTO
EUROPEO NEOROCKS

Relatore:

Prof.ssa Monica Lazzarin

Candidato:

Roberto Balossi

Correlatore:

Dott.ssa Elisa Frattin

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Indice

Abstract	1
Introduzione	1
1 Near-Earth Objects e Potentially Hazardous Asteroids	3
1.1 Classificazione dinamica NEO	3
1.2 Proprietà generali dei NEO	4
1.2.1 Effetto Yarkovsky	5
1.3 Classificazione tassonomica dei NEO	6
1.3.1 Classificazione Tholen	6
1.3.2 Classificazione Bus	9
1.4 Potentially Hazardous Asteroids	10
1.4.1 Scala Torino	11
1.4.2 Scala Palermo	12
1.5 NEOROCKS	13
2 Apophis	14
2.1 Caratteristiche orbitali e fisiche	14
2.2 Storia delle osservazioni	17
2.3 Passaggio del 2029	18
2.4 Potenziali missioni future	19
2.4.1 Apophis Express	20
2.4.2 OSIRIS-REx	21
3 Acquisizione, riduzione e analisi dei dati	22
3.1 Acquisizione delle immagini	22
3.2 Riduzione dati	23
3.2.1 Sottrazione del bias	23
3.2.2 Correzione per flat field	24
3.2.3 Calibrazione in lunghezza d'onda	25
3.2.4 Estrazione dello spettro	26
3.3 Analisi dei dati	28
3.3.1 Correlazione con le condriti ordinarie	31
Conclusioni	34

Elenco delle figure

1.1	L'effetto Yarkovsky diurno (a sinistra) e stagionale (a destra). (Credit: Bottkle et al., 2002)	6
1.2	Gli spettri dei tipi tassonomici introdotti da Bus e Binzel. (Credit: DeMeo et al., 2009)	9
1.3	La Sentry Risk Table.	11
1.4	Grafico energia cinetica-probabilità di impatto che mostra i dieci livelli di pericolosità sulla Scala Torino.	12
2.1	L'orbita di Apophis. (Credit: Denilson Paulo Souza dos Santos)	15
2.2	Modello 3D di Apophis. (Credit: Brozovic et al., 2018)	16
2.3	Lo spettro di Apophis. Sono evidenti i due assorbimenti a 1 μm e 2 μm . (Credit: Reddy et al., 2018)	17
2.4	La traiettoria che seguirà Apophis durante il passaggio del 2029. (Credit: NASA)	19
3.1	Schema che descrive l'airmass. (Credit: M. Richmond, RIT)	22
3.2	La posa di Apophis a cui è stato sottratto il bias e rimosse le strisce di overscan. Le linee orizzontali appaiono incurvate dato che non è ancora stata fatta la calibrazione in lunghezza d'onda. Lo spettro di Apophis è la quinta linea verticale partendo da destra.	24
3.3	Il flat normalizzato.	25
3.4	La posa di Apophis calibrata in lunghezza d'onda. La posizione dello spettro di Apophis è segnato dai due tratti rossi.	26
3.5	Lo spettro finale di Apophis.	28
3.6	Lo spettro dell'analogo.	28
3.7	Lo spettro di Apophis precedente alla divisione per l'analogo solare.	29
3.8	Lo spettro ridotto di Apophis (in blu) e lo spettro standard di un asteroide di tipo Sq (in rosso).	30
3.9	Gli spettri dei tre sottogruppi principali delle condriti ordinarie. (Credit: Cambridge University)	32
3.10	Lo spettro di Apophis (in blu) confrontato con quello di un generico asteroide di tipo Sq (in nero) e con quello della meteorite Jelica (in rosso).	33

Abstract

Questa tesi, svoltasi nell'ambito del progetto europeo NEOROCKS, si propone di determinare il tipo spettrale e la composizione di (99942) Apophis, un asteroide potenzialmente pericoloso che al momento della sua scoperta avvenuta nel 2004 sembrava avesse una possibilità non nulla di impattare con la Terra nel 2029. Le campagne osservative degli anni seguenti hanno portato a zero questa probabilità, ma Apophis rimane un asteroide da tenere continuamente monitorato. Nel primo capitolo di questo lavoro vengono descritte le proprietà generali dei Near Earth Objects, nel secondo vengono approfondite le caratteristiche fisiche e orbitali di Apophis, focalizzandosi sul passaggio del 2029. Il terzo e ultimo capitolo è dedicato alla riduzione e all'analisi dei dati da me ottenuti nel corso della notte del 16 aprile 2021 dal Telescopio Copernico di Cima Ekar. Tali osservazioni hanno permesso di determinare che Apophis appartiene al Gruppo S della classificazione di Tholen e al Gruppo Sq della classificazione di Bus e Binzel, in accordo con quanto trovato da precedenti lavori. Da questo studio e da confronti con la letteratura si deduce una composizione percentuale fatta per il $(63 \pm 3) \%$ da olivina e per il resto da ortopirosseni, con tracce di altri minerali silicati come clinopirosseni. Questa composizione è compatibile con quelle delle condriti ordinarie LL e sembra suggerire che Apophis sia un corpo progenitore di questa classe di meteoriti.

Introduzione

(99942) Apophis è un asteroide potenzialmente pericoloso che nel 2029 transiterà a una distanza di soli 31900 km dalla superficie terrestre, diventando per un breve periodo di tempo visibile a occhio nudo. Sarà la prima volta nella storia che si registrerà un incontro ravvicinato di questo tipo con un asteroide di tali dimensioni.

Il passaggio del 2029 sarà un'opportunità unica per studiare e comprendere la natura di Apophis e degli asteroidi potenzialmente pericolosi.

A partire dal 2004, anno della sua scoperta, Apophis è stato continuamente monitorato ed è stato oggetto di numerose campagne osservative che hanno coinvolto astronomi provenienti da ogni parte del mondo. Questo lavoro di tesi è stato condotto nell'ambito della campagna osservativa del 2020/2021 recentemente conclusasi e del progetto europeo di difesa planetaria NEOROCKS (NEO Rapid Observation, Characterization and Key Simulations).

I dati descritti in questa tesi sono stati ottenuti nella notte del 16 aprile 2021 dal telescopio Copernico di Cima Ekar, Asiago. La riduzione e l'analisi delle immagini ha permesso di determinare il tipo spettrale di Apophis, che è stato poi confrontato con quanto trovato nella letteratura scientifica.

Conoscere il tipo spettrale di un asteroide potenzialmente pericoloso come Apophis è fondamentale per ricavarne le proprietà strutturali, tra cui la composizione superficiale. Da queste è possibile ricavare l'effettiva pericolosità di un asteroide, stabilendo quali conseguenze ci sarebbero in caso di un impatto con la Terra.

Nel primo capitolo di questo lavoro vengono descritte le caratteristiche generali dei Near Earth Objects (NEO) e come vengono suddivisi sulla base delle proprietà orbitali e spettrali. La seconda parte del capitolo è focalizzata sui potentially hazardous asteroids (PHA), con un accenno alle due principali scale che permettono di quantificare la loro pericolosità. Viene poi infine brevemente descritto NEOROCKS, il principale progetto europeo di difesa planetaria.

Il secondo capitolo è dedicato ad Apophis. La prima parte descrive le sue caratteristiche fisiche e orbitali e le campagne osservative che si sono svolte a partire dal momento della sua scoperta. La seconda parte si concentra invece sul futuro, in particolare sul passaggio del 2029 e sulle principali proposte di missioni che sono state avanzate fino ad oggi.

Il terzo ed ultimo capitolo riguarda la parte pratica di questo lavoro. La prima parte è una descrizione di come sono state acquisite le immagini, mentre la seconda si concentra sulla riduzione dati, eseguita con IRAF. L'ultima parte è dedicata all'analisi dello spettro di Apophis per determinarne il tipo spettrale. Confrontando lavori trovati in letteratura è stata ricavata la composizione mineralogica superficiale più probabile per l'asteroide, che è stata poi confrontata con quella delle meteoriti alla ricerca di una correlazione tra Apophis e una delle classi di questi oggetti.

1. Near-Earth Objects e Potentially Hazardous Asteroids

Ad oggi sono noti quasi 1100000 asteroidi¹ all'interno del Sistema Solare. Si ritiene che questi oggetti siano residui del disco protoplanetario che non sono stati incorporati dai pianeti. A differenza dei pianeti e delle lune, la maggior parte di questi oggetti non ha subito processi di rimodellamento (erosione, metamorfismo, ecc.) ed è rimasta inalterata dal momento della sua formazione. Gli asteroidi sono quindi un potente mezzo che permette di indagare le prime fasi di vita del Sistema Solare.

La maggior parte degli asteroidi orbita nella regione compresa tra l'orbita di Marte e quella di Giove nota come Fascia Principale. Sono presenti poi diversi altri gruppi dinamici situati a diverse distanze dal Sole. I gruppi vengono definiti in base alle risonanze orbitali con Giove e Nettuno o all'intersezione della loro orbita con quella di altri pianeti. Nel primo caso rientrano i Troiani di Giove, i Centauri e gli oggetti Trans Nettuniani, nel secondo i Mars Crossers e i Near Earth Objects (NEOs).

1.1 Classificazione dinamica NEO

Vengono classificati come NEO tutti gli asteroidi e le comete con perielio inferiore a 1.3 UA. Per le comete bisogna fare un'ulteriore restrizione, considerando solo quelle a corto periodo, che compiono quindi una rivoluzione attorno al Sole in meno di 200 anni.

La gran parte dei NEO sono asteroidi (Near Earth Asteroids, NEA) che vengono ulteriormente suddivisi in quattro sottogruppi (Atira, Aten, Apollo e Amor) sulla base della loro perielio q , afelio Q e semiasse maggiore a . I sottogruppi sono definiti come segue²:

- **Atira**; presentano un semiasse maggiore più piccolo di quello terrestre ($a < 1.0$ UA) e afelio minore del perielio terrestre ($Q < 0.983$ UA). La loro orbita è contenuta interamente nell'orbita della Terra. Sono noti solo una ventina di questi oggetti, di cui solamente uno con orbita totalmente interna a quella di Venere.
- **Aten**; presentano un semiasse maggiore più piccolo di quello terrestre ($a < 1.0$ UA) e afelio maggiore del perielio terrestre ($Q > 0.983$ UA). Sono asteroidi Earth Crossing.
- **Apollo**; presentano un semiasse maggiore più grande di quello terrestre ($a > 1.0$ UA) e perielio inferiore all'afelio terrestre ($q < 1.017$ UA). Sono asteroidi Earth Crossing. La maggior parte dei NEO conosciuti rientra in questo gruppo.
- **Amor**; presentano un semiasse maggiore più grande di quello terrestre ($a > 1.0$ UA) e un perielio compreso tra 1.017 UA $< q < 1.3$ UA. Non sono asteroidi Earth Crossing; la loro orbita è interamente compresa tra quella della Terra e quella di Marte.

¹<https://minorplanetcenter.net/>

²https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html

1.2 Proprietà generali dei NEO

L'importanza di studiare i NEO è stata da lungo tempo riconosciuta da tutta la comunità scientifica internazionale. I NEO data la loro vicinanza sono oggetti potenzialmente pericolosi che in futuro potrebbero collidere con il nostro pianeta. Il loro studio permette di ridurre questo rischio e di ricostruire gli impatti avvenuti in passato, che in alcuni casi hanno influenzato la storia evolutiva della Terra. I NEO inoltre sono i corpi progenitori della gran parte delle meteoriti che cadono sul nostro pianeta.

I NEO sono una popolazione eterogenea: al loro interno sono stati osservati oggetti con proprietà estremamente diverse uno dall'altro. Le loro dimensioni sono in media molto inferiori a quelle degli asteroidi della Fascia Principale: il loro diametro varia dai 40 km di 1036 Ganymed ai pochi metri degli oggetti più piccoli. L'assenza di NEO con diametro superiore a 40 km viene interpretata come un'indicazione che i NEO non sono oggetti primordiali, ma sono dei frammenti di asteroidi più antichi appartenuti alla Fascia Principale e andati distrutti.

Sono stati osservati alcuni NEO (ad esempio Itokawa, studiato dalla sonda Hayabusa) che presentano una struttura interna detta a *rubble pile*. Tali asteroidi non sono corpi monolitici, ma sono costituiti da un'aggregazione di rocce tenute assieme dalla forza di gravità. Oggetti con questo tipo di struttura possono essere riconosciuti dal basso valore della loro densità non compatibile con una composizione totalmente rocciosa o ghiacciata, dovuta alle diverse cavità vuote presenti al loro interno [31].

Le osservazioni radar hanno mostrato che i NEO assumono le forme più disparate: sono infatti stati osservati oggetti quasi sferici, altri molto allungati e anche alcuni sistemi binari a contatto.

I periodi di rotazione dei NEO variano invece tra le due ore per i corpi più veloci fino ai quasi 50 giorni per l'asteroide 288 Glauke. Questi asteroidi (detti *tumbling asteroids*) presentano solitamente una rotazione complessa che non si svolge attorno ad un asse principale, ma coinvolge diversi assi di rotazione [15].

Le orbite dei NEO sono instabili su un periodo di tempo di qualche decina di milione di anni. Le continue interazioni gravitazionali con i pianeti interni continuano infatti a modificare le loro orbite fino a quando non terminano la loro vita venendo espulsi dal Sistema Solare o collidendo con uno dei pianeti o con il Sole [31].

Lo studio della craterizzazione della Luna ha permesso di stabilire che la popolazione dei NEO è rimasta pressoché costante nel corso degli ultimi due miliardi di anni. Dato che un NEO ha una vita media di cento milioni di anni ciò implica che devono essere attivi dei meccanismi di trasporto che continuano a rifornire il Sistema Solare interno di asteroidi.

La sorgente principale è la Fascia Principale [2], in particolare le regioni nei pressi della risonanza orbitale 3:1 con Giove e della risonanza secolare ν_6 con Saturno. La Fascia Principale è infatti attraversata da un gran numero di risonanze che regolano la distribuzione della popolazione di asteroidi. Le risonanze vengono divise in due categorie:

- **Risonanze di moto medio**; si trovano alle distanze dal Sole in cui il periodo di rivoluzione è una frazione intera piccola del periodo di rivoluzione di un pianeta. Nelle regioni interne del Sistema Solare le risonanze di moto medio sono principalmente legate a Giove, mentre nelle regioni esterne a Nettuno.
- **Risonanze secolari**; due corpi si trovano in risonanza secolare quando hanno sincronizzate le loro precessioni del perielio o le loro precessioni del nodo ascendente. Le tre risonanze secolari più importanti nella Fascia

Principale sono la v_5 (precessione del perielio simile a quella di Giove), la v_6 (precessione del perielio simile a quella di Saturno) e la v_{16} (precessione del nodo ascendente simile a quella di Giove).

Gli asteroidi che si trovano nei pressi di risonanze di moto medio risentono maggiormente dell'influenza gravitazionale di Giove, che fornisce una potenziale via di uscita dalla Fascia Principale in direzione del Sistema Solare interno. Gli oggetti che si trovano invece nei pressi della risonanza secolare v_6 subiscono un graduale aumento dell'eccentricità dell'orbita che li porta a diventare dei Mars Crossers. Dopo un passaggio ravvicinato nei pressi di Marte, gli asteroidi vengono generalmente espulsi dalla Fascia Principale e inviati nel Sistema Solare interno [11]. Altre sorgenti in grado di rifornire la popolazione di NEO sono la Fascia di Kuiper e la Nube di Oort, da cui provengono delle comete che dopo numerosi passaggi al perielio vengono ricoperte da uno strato di polvere non volatile che impedisce l'emissione di gas. Queste comete vengono dette estinte.

1.2.1 Effetto Yarkovsky

Le risonanze non sono l'unico aspetto che contribuisce a modificare i parametri orbitali degli asteroidi. Su di essi agisce infatti l'effetto Yarkovsky [20].

L'effetto Yarkovsky rappresenta la variazione dell'orbita di un asteroide dovuta all'irradiazione solare e alla conseguente emissione termica. Un corpo che viene illuminato riemette infatti nello spazio il calore assorbito sotto forma di fotoni, che imprimono una piccolissima forza sull'oggetto. Su lunghe scale temporali questa forza diventa significativa e può portare a grandi variazioni dell'orbita dell'asteroide.

Questo effetto fu teorizzato dal polacco Ivan Yarkovsky nel 1900 ed è significativo solo per meteoroidi e asteroidi di piccole dimensioni, dal diametro compreso tra i 10 cm e i 10 km. Per oggetti di dimensioni superiori la forza impressa dai fotoni è troppo piccola per causare variazioni dell'orbita (anche su lungo tempo).

L'effetto Yarkovsky è stato per la prima volta misurato per l'asteroide Golevka, che presenta un diametro di 500 metri [1]. Nel corso di 12 anni, dal 1992 al 2003, l'asteroide è stato continuamente monitorato in modo da determinare accuratamente la sua posizione e la sua orbita. È stato così possibile valutare in 15 km lo spostamento di Golevka rispetto alla sua orbita prevista.

Possiamo distinguere due componenti dell'effetto Yarkovsky:

- **Effetto diurno.** Su un corpo che ruota illuminato dal Sole la superficie si scalda durante il giorno, mentre si raffredda durante la notte. Di conseguenza la superficie tende a essere più calda nel tardo pomeriggio e ad inizio sera, mentre è più fredda nelle altre fasi della giornata. L'emisfero caldo emette quindi più radiazione di quello freddo: la differenza della pressione di radiazione induce una forza la cui direzione dipende dalla rotazione dell'oggetto. Per asteroidi caratterizzati da rotazione progradata la forza è diretta nella stessa direzione del moto orbitale e quindi provoca un aumento del raggio orbitale. Per asteroidi che hanno una rotazione retrogradata la forza ha invece verso opposto al moto orbitale e il semiasse maggiore si riduce.
- **Effetto stagionale.** Questa seconda tipologia tiene conto del fatto che nel corso di un anno uno dei due emisferi dell'asteroide risulta maggiormente esposto alla radiazione solare rispetto all'altro. La forza impressa dalla pressione di radiazione in questo caso dipende dall'inclinazione dell'asse di rotazione rispetto al piano dell'orbita [25].

L'effetto diurno tende a dominare su quello stagionale. Quest'ultimo prevale però per oggetti di piccole dimensioni (fino a 100 metri) e per asteroidi che ruotano molto velocemente su loro stessi (dato che in tal caso non c'è una significativa differenza di temperatura tra notte e giorno) o che hanno asse di rotazione inclinato di 90° (così che un emisfero è sempre illuminato e l'altro no).

Dato uno specifico asteroide, è estremamente complesso stabilire l'esatta variazione della sua orbita dovuta all'effetto Yarkovsky. Questa dipende infatti da un gran numero di variabili (caratteristiche superficiali, albedo, orientazione, ecc) che nella gran parte dei casi sono sconosciute.

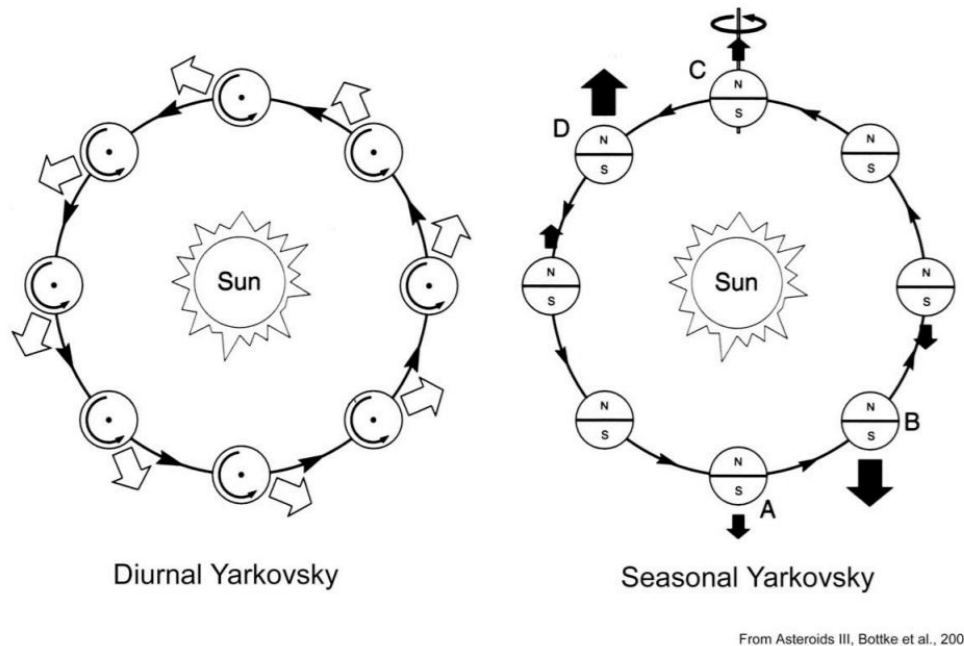


Figura 1.1: L'effetto Yarkovsky diurno (a sinistra) e stagionale (a destra). (Credit: Bottke et al., 2002)

1.3 Classificazione tassonomica dei NEO

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi metodi di classificazione che hanno cercato di raggruppare tra loro gli asteroidi che condividono le stesse caratteristiche spettrali. I metodi più usati sono la **classificazione Bus e Binzel** [23] e la **classificazione Tholen** [30], che in parte condividono alcuni aspetti.

1.3.1 Classificazione Tholen

La classificazione Tholen fu iniziata a sviluppare a partire dal 1984 basandosi sulle osservazioni spettrali tra $0.31 \mu\text{m}$ e $1.06 \mu\text{m}$ condotte nel corso della Eight-Color Asteroid Survey (ECAS), a cui vennero in seguito aggiunte le misurazioni di albedo.

I principali gruppi tassonomici di questa classificazione sono:

- **Gruppo A**; sono asteroidi molto rari, situati principalmente nella Fascia Principale interna. Ad oggi sono noti meno di una ventina di oggetti di questo tipo. Gli asteroidi del Gruppo A sono caratterizzati da uno

spettro molto arrossato a lunghezze d'onda inferiori a $0.7 \mu\text{m}$ e da una banda di assorbimento molto larga a $1 \mu\text{m}$ dovuta all'olivina. Si ritiene che questi oggetti siano frammenti del mantello differenziato di corpi progenitori di più grandi dimensioni (e forse andati distrutti).

- **Gruppo D**; sono asteroidi che presentano uno spettro senza caratteristiche particolari e valori di albedo molto basse, inferiori a 0.05. Gli asteroidi di tipo D sono situati nella Fascia Principale esterna e tra i Troiani di Giove, di cui costituiscono il 60% della popolazione totale. È stato ipotizzato che questi asteroidi siano composti da una complessa miscela di materiale organico e di regolite e che provengano dalla Fascia di Kuiper.
- **Gruppo V**; comprende tutti gli asteroidi che presentano uno spettro simile a quello di Vesta, caratterizzato da due assorbimenti a $1 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$ dovuti ai pirosseni. All'incirca il 6% degli asteroidi della Fascia Principale rientra all'interno di questo gruppo, il cui componente principale è Vesta. La maggior parte degli asteroidi di tipo V, noti come vestoidi, orbitano nelle vicinanze di Vesta, il che suggerisce che siano dei suoi frammenti scagliati nello spazio in seguito ad impatti con altri corpi. Alcuni NEA sono risultati essere vestoidi: ciò dimostra quindi l'efficacia dei meccanismi che trasportano asteroidi dalla Fascia Principale alle regioni del Sistema Solare interno.
- **Gruppo R**; l'unico asteroide che appartiene con sicurezza a questo gruppo è 349 Dembowska. Il suo spettro è molto simile a quello dei vestoidi, dato che presenta le stesse bande di assorbimento dovute ai pirosseni. Ne differisce però per la riflettività più elevata, in particolare a lunghezze d'onda superiori a $1.2 \mu\text{m}$.
- **Gruppo Q**; sono asteroidi molto rari: i pochi noti di questo tipo sono NEO, mentre nessuno appartiene alla Fascia Principale. Gli spettri di questi asteroidi sono arrossati a lunghezze d'onda inferiori a $0.7 \mu\text{m}$ e presentano due bande di assorbimento a $1 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$ dovute all'olivina e ai pirosseni. Tali spettri sono simili a quelli delle condriti ordinarie, che rappresentano circa l'80% dei meteoriti trovati sulla superficie terrestre. Questo sembra suggerire che gli asteroidi di tipo Q siano i corpi progenitori di questa classe di meteoriti, il che implicherebbe però che siano anche molto numerosi. Questo è in contrasto con il basso numero di questi oggetti finora scoperti.
- **Gruppo T**; sono asteroidi molto rari che presentano un'albedo inferiore a 0.10 e uno spettro arrossato a lunghezze d'onda inferiori a $0.85 \mu\text{m}$. Si ritiene che siano composti da materiale carbonaceo fortemente alterato (o termicamente o dall'azione dell'acqua).
- **Gruppo S**; è il secondo gruppo più numeroso, comprendente all'incirca il 17 % di tutti gli asteroidi noti. Sono situati principalmente nella Fascia Principale interna e diventano più rari muovendosi verso l'esterno. Sono caratterizzati da uno spettro molto arrossato per lunghezze d'onda inferiori a $0.7 \mu\text{m}$ e da due assorbimenti di moderata entità a $1 \mu\text{m}$ e $2 \mu\text{m}$. La loro albedo varia tra 0.1 e 0.3. Gli spettri indicano che questi asteroidi sono costituiti da silicati: ciò li rende i corpi progenitori più probabili per le meteoriti rocciose. A causa dei limiti della classificazione Tholen all'interno del gruppo S sono stati identificati oggetti di composizione molto diversa tra loro. Sono stati pertanto introdotti diversi sottogruppi, definiti in base alle diverse composizioni e storie evolutive degli asteroidi.

- **Gruppo M;** è il terzo gruppo più numeroso. Gli asteroidi di questo tipo sono caratterizzati da uno spettro leggermente arrossato e senza particolari caratteristiche. Presentano albedo comprese tra 0.10 e 0.20. I dati finora ottenuti fanno ritenere che gli asteroidi di tipo M siano composti principalmente da ferro e nickel e siano perciò i nuclei metallici differenziati di oggetti di grandi dimensioni andati distrutti. Gli asteroidi di questo gruppo sono i corpi progenitori più probabili per le meteoriti metalliche. Ci sono tuttavia alcuni asteroidi di questo tipo che non sembrano essere composti da ferro e nickel: questo è dovuto ai limiti della classificazione Tholen, basata sulle caratteristiche dello spettro in un limitato intervallo di lunghezze d'onda.
- **Gruppo E;** sono asteroidi che presentano uno spettro senza caratteristiche, molto simile a quello degli asteroidi di tipo M. Si differenziano da questi ultimi per via della loro elevata albedo, superiore a 0.3. Si ritiene che la superficie di questi oggetti sia costituita da silicati poveri in ferro, come ad esempio enstatite o feldspato. Il gruppo degli Hungaria all'interno della Fascia Principale (tra 1.79 UA e 1.98 UA) contiene la metà di tutti gli asteroidi di tipo E noti. Si crede che alcuni NEO di questo gruppo siano i corpi progenitori delle aubriti, una sottoclasse delle meteoriti acondriti.
- **Gruppo P;** sono asteroidi che presentano degli spettri arrossati senza particolari assorbimenti, simili a quelli degli asteroidi dei gruppi M ed E. Si differenziano da questi ultimi per via della loro albedo, inferiore a 0.10. Gli asteroidi di tipo P sono infatti tra gli oggetti più scuri di tutto il Sistema Solare. Abbondanti nelle regioni esterne della Fascia Principale, si ritiene che siano asteroidi primitivi che presentano in superficie grandi quantità di materiale organico leggermente alterato dall'azione dell'acqua.
- **Gruppo C;** contiene il 75% di tutti gli asteroidi noti. Questi oggetti dominano nelle regioni esterne della Fascia Principale, dove compongono l'80% di tutta la popolazione, ma diventano più rari spostandosi verso l'interno. Gli asteroidi di tipo C sono caratterizzati da albedo molto basse (inferiori a 0.10) e da una composizione superficiale costituita per gran parte da carbonio. Sembrano pertanto essere i corpi progenitori più probabili per le condriti carbonacee. Gli spettri di questi oggetti appaiono simili tra loro e senza assorbimenti nelle lunghezze d'onda utilizzate dalla survey ECAS, ma si diversificano se le osservazioni vengono allargate all'ultravioletto e al FIR. Su questo intervallo spettrale gli asteroidi di tipo C vengono infatti suddivisi in tre sottogruppi (F, B e G), in base all'intensità della banda di assorbimento a 3 μm che indica il livello di idratazione dei minerali superficiali.

Gli asteroidi di tipo M, E e P presentano spettri simili tra loro e la variabile discriminante che permette di riconoscerli è l'albedo. Gli oggetti il cui spettro rientra in uno di questi tre tipi ma la cui albedo non è nota con precisione vengono classificati nel **Gruppo X**.

Le osservazioni spettroscopiche dei NEO hanno permesso di derivare la loro mineralogia e di classificare la loro tassonomia. I NEO sono risultati essere un gruppo estremamente eterogeneo: sono stati infatti identificati tutti i tipi tassonomici presenti all'interno della Fascia Principale (Lazzarin et al., 2005) [10].

A differenza della Fascia Principale, il tipo spettrale più comune tra i NEO è il tipo S. Questa è un'ulteriore prova che i NEO siano originari della Fascia Principale, in particolare delle regioni più interne nei pressi delle risonanze 3:1 e v_6 , dove gli asteroidi di tipo S sono i più comuni.

1.3.2 Classificazione Bus

Introdotta da Bus e Binzel nel 2002, la classificazione è basata sugli spettri di 1447 asteroidi ottenuti nel corso della seconda fase della Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASSII). Questa survey ha prodotto spettri a più alta risoluzione rispetto all'ECAS, ma su un intervallo di lunghezze d'onda più piccolo (tra 0.44 μm e 0.92 μm). Non viene inoltre tenuta in considerazione l'albedo.

La classificazione Bus ha mantenuto i tre gruppi principali della classificazione Tholen (S, C, X) e ha definito 26 classi spettrali sulla base della presenza/assenza di specifiche caratteristiche spettrali. Un nuovo asteroide può quindi venire facilmente classificato all'interno di una di queste classi solamente sulla base delle sue caratteristiche spettrali.

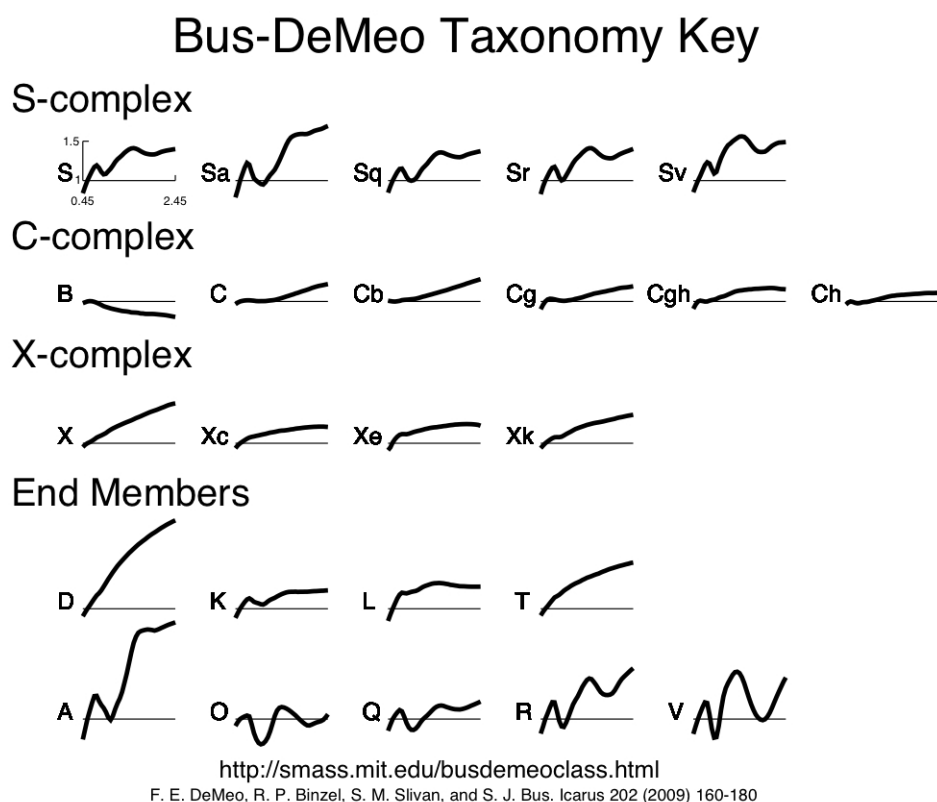


Figura 1.2: Gli spettri dei tipi tassonomici introdotti da Bus e Binzel. (Credit: DeMeo et al., 2009)

In particolare ad asteroidi che presentano caratteristiche spettrali intermedie tra due classi viene assegnata una designazione multilettera. Ad esempio 99942 Apophis è classificato come di tipo Sq, dato che presenta caratteristiche intermedie tra il tipo S e il tipo Q.

1.4 Potentially Hazardous Asteroids

Tra i NEO rivestono una particolare importanza gli asteroidi potenzialmente pericolosi (**Potentially Hazardous Asteroids, PHA**). In questa categoria rientrano tutti quegli oggetti la cui minima distanza all'intersezione dell'orbita terrestre (MOID) è inferiore a 0.05 UA e la cui magnitudine assoluta H è minore di 22 (il che assumendo un'albedo di 0.14 si traduce in un diametro di 150 metri). Questi asteroidi sono infatti quelli che, in caso di impatto con la Terra, provocherebbero danni devastanti su scala globale. Ad oggi sono noti circa 2500 PHA, la maggior parte dei quali sono asteroidi Apollo.

Quando si scopre un asteroide si cerca di determinare la sua orbita in base alle osservazioni disponibili. L'orbita, definita da sei parametri, è influenzata dalle attrazioni gravitazionali che vengono esercitate sull'asteroide dal Sole, dai pianeti, dalla Luna e dagli asteroidi più massicci³. Date un certo numero di osservazioni si cerca di stabilire l'orbita futura dell'oggetto attraverso dei programmi di integrazione numerica [8]. Più osservazioni si hanno, più l'orbita risulterà accurata.

Nella pratica ci si aspetta quindi di avere una regione di incertezza all'interno della quale si trova la vera orbita dell'asteroide. Più osservazioni dell'oggetto si hanno, più la regione di incertezza sarà stretta. Asteroidi noti da molto tempo si muoveranno quindi su orbite ben conosciute, mentre l'orbita di asteroidi appena scoperti è quanto più incerta.

In ogni caso, l'orbita di un asteroide non sarà mai nota perfettamente. Saranno sempre presenti degli aspetti (tra cui l'effetto Yarkovsky) che produrranno un certo grado di incertezza.

Al momento della scoperta di un PHA sulla base delle osservazioni disponibili si determina la sua orbita per i successivi 100 anni. Si determinano in tal modo gli incontri ravvicinati che l'asteroide avrà con la Terra e, conoscendo la regione di incertezza, le probabilità di collisione con il nostro pianeta.

La maggior parte dei PHA noti ha una possibilità nulla di impatto con la Terra nel prossimo secolo. Ciò non significa che non possano diventare rischiosi in futuro.

I PHA invece che presentano una possibilità non nulla di collisione con il nostro pianeta per i prossimi 100 anni vengono catalogati nella **Sentry Risk Table**⁴. Questo è un sistema informatico automatico gestito dal CNEOS che raggruppa in un unico sito tutti gli asteroidi con probabilità non nulla di impatto con la Terra. Solitamente un NEA viene inserito nella Sentry Risk Table quando al momento della sua scoperta l'orbita non è nota con precisione. In seguito ad altre osservazioni normalmente l'oggetto viene rimosso non risultando più pericoloso. Il record di permanenza sulla Sentry Risk Table è detenuto da (99942) Apophis, rimasto in lista dal momento della sua scoperta avvenuta nel 2004 fino al 26 marzo 2021.

Al luglio 2021 erano 22 gli asteroidi presenti all'interno della tabella:

³<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/intro.html>

⁴<https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/>

Object Designation	Year Range	Potential Impacts	Impact Probability (cumulative)	V_{∞} (km/s)	H (mag)	Estimated Diameter (km)	Palermo Scale (cum.)	Palermo Scale (max.)	Torino Scale (max.)
29075 (1950 DA)	2880-2880	1	1.2e-4	14.10	17.6	1.300	-1.42	-1.42	
101955 Benu (1999 RQ36)	2175-2199	78	3.7e-4	5.99	20.2	0.490	-1.69	-2.30	
(2010 MZ112)	2029-2121	217	1.1e-5	1.63	19.7	0.390	-2.36	-3.39	0
(2009 JF1)	2022-2022	1	2.6e-4	23.92	27.1	0.013	-2.58	-2.58	0
(2000 SG344)	2069-2120	101	2.2e-3	1.36	24.8	0.037	-2.89	-3.20	0
(2007 FT3)	2024-2120	171	1.3e-6	17.05	20.0	0.340	-2.96	-3.44	0
(2008 JL3)	2027-2119	28	1.6e-4	8.42	25.3	0.029	-3.17	-3.17	0
(2021 EU)	2024-2056	3	4.6e-5	21.46	25.4	0.028	-3.28	-3.31	0
(2010 RF12)	2095-2120	69	4.7e-2	5.10	28.4	0.007	-3.32	-3.33	0
(2005 QK76)	2030-2107	11	7.1e-5	19.67	25.2	0.031	-3.39	-3.53	0
(2021 GX9)	2032-2032	1	9.0e-5	16.79	25.3	0.029	-3.40	-3.40	0
(2005 ED224)	2023-2064	4	2.6e-6	24.96	24.0	0.054	-3.45	-3.46	0
(2012 HG2)	2052-2121	437	3.2e-3	3.33	27.0	0.014	-3.68	-4.24	0
(2008 UB7)	2044-2100	32	3.2e-5	18.53	23.8	0.058	-3.69	-4.28	0
(2007 DX40)	2030-2119	38	7.4e-5	15.52	24.6	0.040	-3.72	-4.09	0
(2000 SB45)	2074-2113	99	1.6e-4	7.53	24.3	0.046	-3.74	-4.22	0
(2012 QD8)	2047-2050	2	6.0e-6	20.76	23.1	0.081	-3.78	-3.85	0
(2008 EX5)	2062-2090	13	5.3e-5	9.92	23.8	0.059	-3.81	-4.08	0
(2017 WT28)	2083-2120	75	1.1e-2	4.47	28.1	0.008	-3.85	-3.88	0
(2020 VW)	2074-2087	16	7.0e-3	9.69	28.3	0.007	-3.85	-4.14	0
(2020 VV)	2044-2111	136	2.3e-3	2.57	27.3	0.012	-3.88	-4.36	0
(2013 VW13)	2076-2084	9	4.4e-4	16.35	26.2	0.019	-3.89	-4.06	0

Figura 1.3: La Sentry Risk Table.

Oltre alla probabilità di collisione e alcune caratteristiche dell'oggetto (magnitudine assoluta, diametro) nella tabella vengono riportati i valori dell'asteroide sulla **Scala Torino** e **Scala Palermo**. Queste sono due classificazioni che permettono di quantificare il pericolo associato ad ogni asteroide: la Scala Torino è stata pensata per la comunicazione al pubblico, la Scala Palermo è più tecnica e viene usata direttamente dagli astronomi.

I livelli di rischio riportati per i 22 asteroidi sulla Sentry Risk Table sono tutti al di sotto del livello di fondo, definito come il rischio medio della popolazione complessiva dei NEA.

1.4.1 Scala Torino

Ideata da Binzel nel 1995 [22] e perfezionata negli anni successivi, la Scala Torino permette di stabilire la pericolosità di un PHA sulla base della sua probabilità di impatto con la Terra e dell'energia cinetica che sprigionerebbe nel caso di impatto.

Un PHA all'interno della Scala Torino può assumere valori interi che vanno da 0 a 10, dove lo 0 indica una probabilità nulla di impatto o dimensioni troppo piccole per causare danni (ad esempio le meteore) e il 10 una collisione certa con conseguenze catastrofiche a livello globale.

La scala Torino può essere visualizzata in un grafico energia cinetica-probabilità di impatto (fig. 1.4), in cui i diversi colori indicano i gradi di pericolosità dell'asteroide: bianco indica nessun rischio, il verde normale, il giallo indica oggetti che devono essere monitorati, l'arancione sta per eventi preoccupanti, mentre infine il rosso è per le collisioni certe.

Al momento della sua scoperta nel 2004 l'asteroide 99942 Apophis venne classificato come di livello 4, il valore più alto mai raggiunto da un asteroide su questa scala. Osservazioni negli anni successivi hanno permesso di determinare più accuratamente la sua orbita e di riportarlo a livello 0.

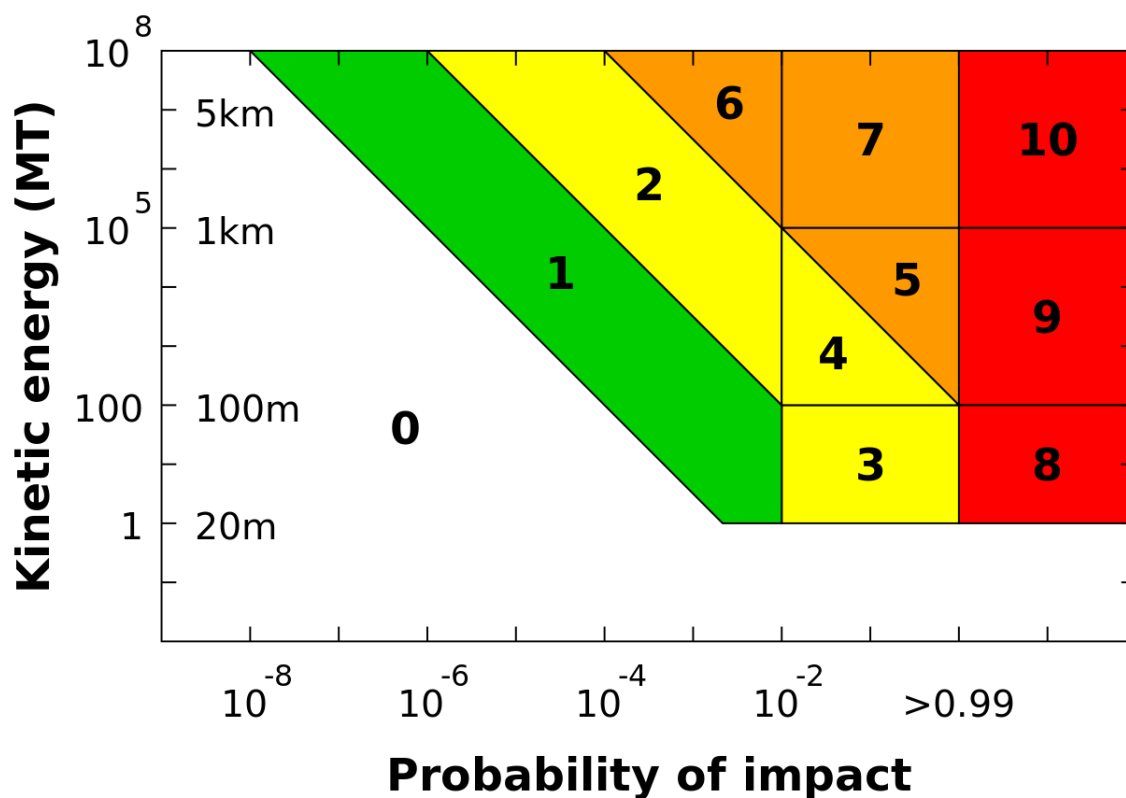


Figura 1.4: Grafico energia cinetica-probabilità di impatto che mostra i dieci livelli di pericolosità sulla Scala Torino.

1.4.2 Scala Palermo

La Scala Palermo⁵ è una scala logaritmica che combina in un singolo valore la probabilità di impatto e l'energia cinetica che verrebbe rilasciata in tal caso.

Il valore zero indica un livello uguale al rischio di fondo, definito come il rischio che un altro oggetto di dimensioni simili o maggiori di quello considerato possa impattare con la Terra nello stesso lasso tempo. Valori inferiori a -2 indicano oggetti con conseguenze trascurabili, valori tra -2 e 0 sono assunti invece da asteroidi che meritano un attento monitoraggio. Dei 22 oggetti riportati nella Sentry Risk Table di fig. 1.4 solo due rientrano in quest'ultima categoria.

Il record per il valore più elevato raggiunto sulla scala Palermo è detenuto da Apophis, che nel dicembre 2004 raggiunse il valore 1.12 per l'incontro ravvicinato del 2029. La probabilità di impatto era 12.6 volte quella del rischio di fondo. Le osservazioni seguenti hanno permesso di ridurre tale valore.

Da quando è stata introdotta la Scala Palermo solo due altri asteroidi hanno avuto valori positivi: (89959) 2002 NT7 e (29075) 1950 DA, che nel 2002 hanno raggiunto rispettivamente i valori +0.06 e +0.17.

⁵https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/palermo_scale.html

1.5 NEOROCKS

L'importanza dello studio dei NEO e dei PHA è dimostrata dai numerosi progetti di difesa planetaria che sono stati varati nel corso degli anni. In Europa il principale è NEOROCKS⁶, finanziato dall'Unione Europea, coordinato dall'INAF e a cui partecipa anche il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova.

L'obiettivo di NEOROCKS è quello di perfezionare le operazioni con cui vengono scoperti i NEO, favorendo la collaborazione internazionale tra i vari gruppi di ricerca. Il progetto si propone inoltre di migliorare i modelli che permettono di derivare le proprietà fisiche e orbitali degli asteroidi, con obiettivo finale quello di sviluppare sistemi utili per la protezione di persone e infrastrutture da potenziali impatti.

All'interno del progetto possono essere riconosciute due sfide principali. La prima è rimanere al passo con la caratterizzazione delle proprietà fisiche dei NEO, che vengono scoperti in numero sempre più elevato. La seconda è riuscire a monitorare tutti gli asteroidi in grado di causare danni in caso di impatto, in particolare quei corpi di soli pochi metri di diametro che vengono scoperti quando già si trovano nei pressi della Terra.

L'approccio di NEOROCKS è basato su diversi aspetti complementari tra loro:

- collaborazione tra team di astronomi con accesso a telescopi di grande apertura dotati della strumentazione scientifica più avanzata;
- ricerca di tecniche che permettono di eseguire osservazioni di follow up dopo aver determinato l'orbita di NEO appena scoperti, in modo da far fronte alle possibili minacce di impatto;
- trarre profitto dall'industria spaziale europea per la pianificazione e la progettazione di esperimenti innovativi, tra cui telescopi robotici a risposta rapida altamente automatizzati;
- una veloce diffusione dei dati ottenuti a livello globale, in modo da rendere la loro analisi accessibile a più gruppi di ricerca.

Per la riuscita del progetto, NEOROCKS ha già coinvolto i maggiori esperti mondiali di NEO ed è sostenuto da numerose industrie europee ed istituzioni governative, che garantiscono il sostegno economico e organizzativo, tra cui l'accesso ai principali telescopi europei.

⁶<https://www.neorocks.eu>

2. Apophis

(99942) Apophis è un asteroide potenzialmente pericoloso che al momento della sua scoperta avvenuta nel 2004 ha causato un breve periodo di allarme. Le osservazioni sembravano infatti indicare una probabilità di collisione del 2,7% per il passaggio del 2029. Fu la prima volta nella storia che si dovette fronteggiare un rischio così elevato. Ciò attirò l'attenzione dei mass media, mentre la comunità scientifica internazionale si concentrò sullo studio dell'asteroide. Le osservazioni dei mesi successivi permisero di escludere qualsiasi probabilità di impatto nel 2029, mentre la campagna osservativa del 2020/2021 appena conclusa ha stabilito che non esiste nessuna possibilità di collisione tra la Terra e Apophis per il prossimo secolo.

Apophis resta tuttavia un oggetto molto interessante da tenere continuamente monitorato. Non si può infatti escludere che in futuro la sua orbita venga modificata e che ciò lo porti a collidere con il nostro pianeta.

In ogni caso Apophis rappresenta un perfetto esempio di PHA: continuare ad osservarlo significa comprendere più a fondo questa classe di oggetti. Ciò ha importanti ricadute in diversi campi scientifici, tra cui la difesa planetaria, in quanto permette di migliorare le tecniche di prevenzione.

Il passaggio del 2029 sarà un'opportunità unica per studiare questo oggetto e, di conseguenza, tutti i PHA. Apophis transiterà infatti talmente vicino alla superficie terrestre che apparirà di terza magnitudine apparente. Sarà la prima volta nella storia da quando si registrano questo tipo di passaggi che un asteroide sarà visibile a occhio nudo.

2.1 Caratteristiche orbitali e fisiche

Apophis è un asteroide del Gruppo Aten. Si muove su un'orbita che presenta un semiasse maggiore di 0.92 UA e un'eccentricità di 0.19. Il suo afelio e il suo perielio si trovano rispettivamente a 1.10 UA e 0.75 UA dal Sole. La sua orbita è inclinata di 3.34° rispetto al piano dell'eclittica. L'asteroide completa una rivoluzione attorno al Sole in 0.89 anni.¹ I parametri orbitali di Apophis sono noti con grande precisione grazie alla campagna osservativa internazionale svoltasi durante il passaggio del 2020/2021. In particolare recentemente è stato possibile determinare per la prima volta l'effetto Yarkovsky che agisce sull'asteroide (Tholen, Farnocchia, 2020) [26], permettendo così di prevedere più accuratamente come evolverà in futuro la sua orbita. Le osservazioni sono state condotte con il telescopio Subaru tra il gennaio e il marzo 2020. Nel corso di queste notti, grazie alle favorevoli condizioni osservative, è stato possibile ottenere la posizione dell'asteroide con un errore di soli 10 miliardesimi di secondo. Combinando questi dati con osservazioni passate si è ricavato uno spostamento del semiasse maggiore dell'orbita di circa 170 metri. Questi risultati, compatibili con quanto si trova dalla teoria dell'effetto Yarkovsky, hanno notevolmente migliorato la conoscenza dell'orbita futura di Apophis, permettendo di escludere qualsiasi possibilità di impatto con la Terra nel 2068.

¹https://iawn.net/obscamp/Apophis/apophis_orbit.shtml

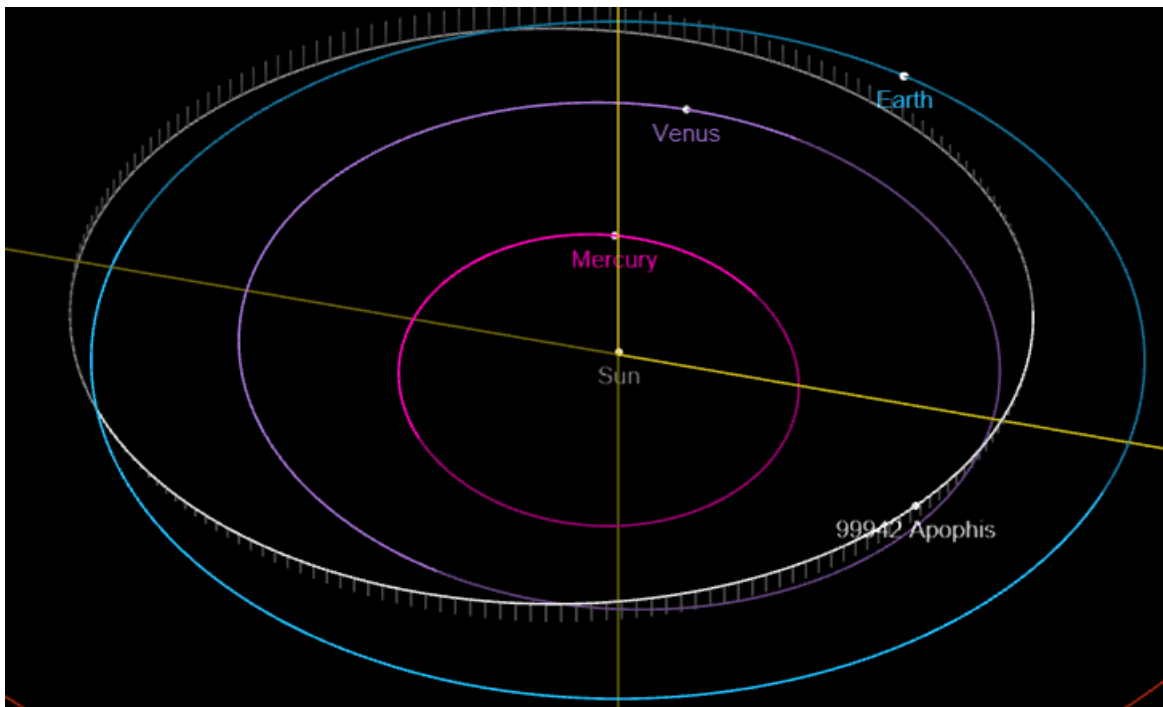


Figura 2.1: L'orbita di Apophis. (Credit: Denilson Paulo Souza dos Santos)

Contemporaneamente alla determinazione dell'orbita si è cercato di determinare le proprietà fisiche di Apophis. È infatti di fondamentale importanza conoscere le sue dimensioni e la sua struttura per stabilire le conseguenze di un eventuale impatto con la Terra. A parità di velocità, il danno prodotto da una collisione con Apophis dipenderebbe infatti dalla sua massa. Supponendo che l'asteroide presenti una struttura monolitica l'energia liberata durante l'impatto provocherebbe danni su scala regionale (livello 9 sulla Scala Torino). Se invece Apophis presentasse una struttura a rubble pile con diverse cavità vuote al suo interno allora l'energia liberata sarebbe minore, provocando danni su scala locale (livello 8 sulla Scala Torino).

Le osservazioni radar condotte tra il 2012 e il 2013 con i radiotelescopi di Arecibo e Goldstone (Brozovic et al., 2018) [4] hanno permesso di determinare la forma e le dimensioni dell'asteroide sfruttando i ritardi temporali dovuti ai diversi cammini ottici e le differenze di frequenza del segnale riflesso (tecnica del Doppler-Delay). I dati suggeriscono che Apophis sia un corpo dalla forma elongata e asimmetrica, forse bilobata, con un asse maggiore non superiore ai 450 metri e un diametro medio di (0.34 ± 0.04) km. Le osservazioni radar hanno permesso di derivare un modello 3D dell'asteroide. Combinando i dati radar con le curve di luce (Pravec et al., 2014) [14] è stato possibile inoltre determinare la rotazione dell'asteroide. Apophis ruota attorno al suo asse minore ogni 30.4 ore. Contemporaneamente su un periodo di tempo più lungo l'asteroide oscilla attorno al suo asse maggiore. Apophis è quindi un *tumbling asteroid*, caratterizzato da una rotazione complessa attorno ad un asse non principale. L'asse di rotazione di Apophis è inclinato di -59° rispetto alla perpendicolare al piano orbitale. È quindi un rotatore retrogrado.

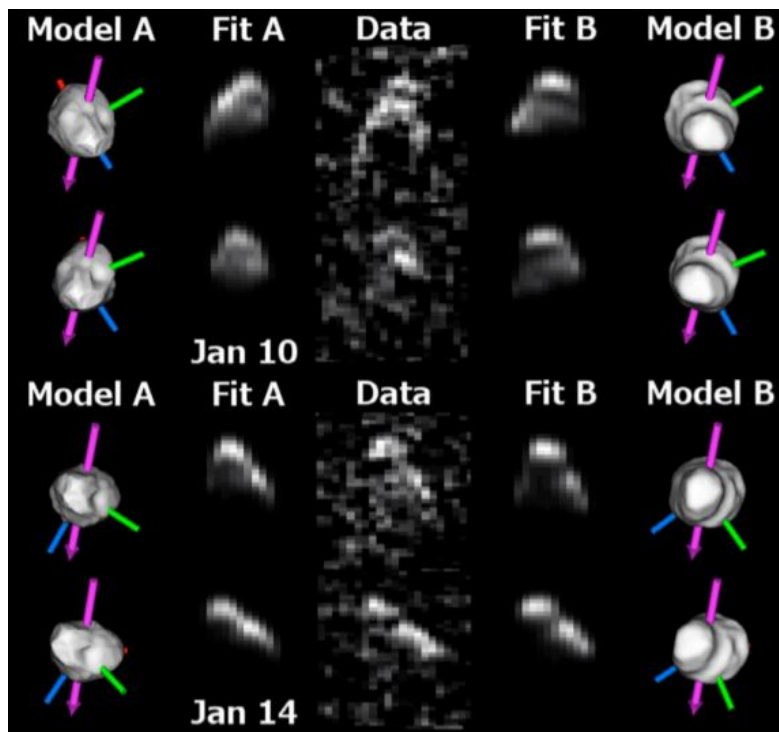


Figura 2.2: Modello 3D di Apophis. (Credit: Brozovic et al., 2018)

Dal momento della sua scoperta la distanza tra Apophis e la Terra è sempre stata troppo elevata per permettere ai più potenti radiotelescopi di ottenere immagini e dati alla risoluzione necessaria per distinguere le caratteristiche della sua superficie e della sua struttura interna, che rimangono pertanto ancora oggi sconosciute.

Osservazioni spettrali condotte nel vicino infrarosso tra $0.55\text{-}2.45\ \mu\text{m}$ con il telescopio Baade a Las Campanas (Binzel et al., 2005) [3] hanno permesso di determinare che Apophis appartiene al tipo spettrale Sq. Lo spettro è caratterizzato da due bande a $1\ \mu\text{m}$ e $2\ \mu\text{m}$, la prima più stretta e profonda, la seconda più larga e meno marcata. Ciò è consistente con una composizione per il 65-75% di olivina, per il 17-27% da ortopirosseni e per il restante da altri minerali silicati. Questa composizione è simile a quella delle meteoriti condriti LL: ciò rende Apophis un oggetto comune tra i PHA. All'incirca i $2/3$ degli asteroidi di questa categoria presentano infatti proprietà spettrali che sono correlate a quelle delle condriti LL.

Osservazioni condotte nel lontano infrarosso dal Telescopio Herschel (Müller et al., 2014) [12] hanno permesso di derivare l'albedo geometrica nella banda V (0.30 ± 0.05) e l'inerzia termica di Apophis. Questi valori sono risultati essere molto simili a quelli dell'asteroide (25143) Itokawa, studiato da vicino dalla sonda giapponese Hayabusa nel 2005. Queste e altre similitudini (anche Itokawa è di classe Sq) fanno ritenere che i due asteroidi possano essere molto simili tra loro. In particolare questo sembrerebbe indicare che Apophis abbia una struttura a rubble-pile. Assumendo poi una porosità e una densità tipica degli asteroidi di tipo Sq si ricava per Apophis una massa dell'ordine di 10^{10} kg.

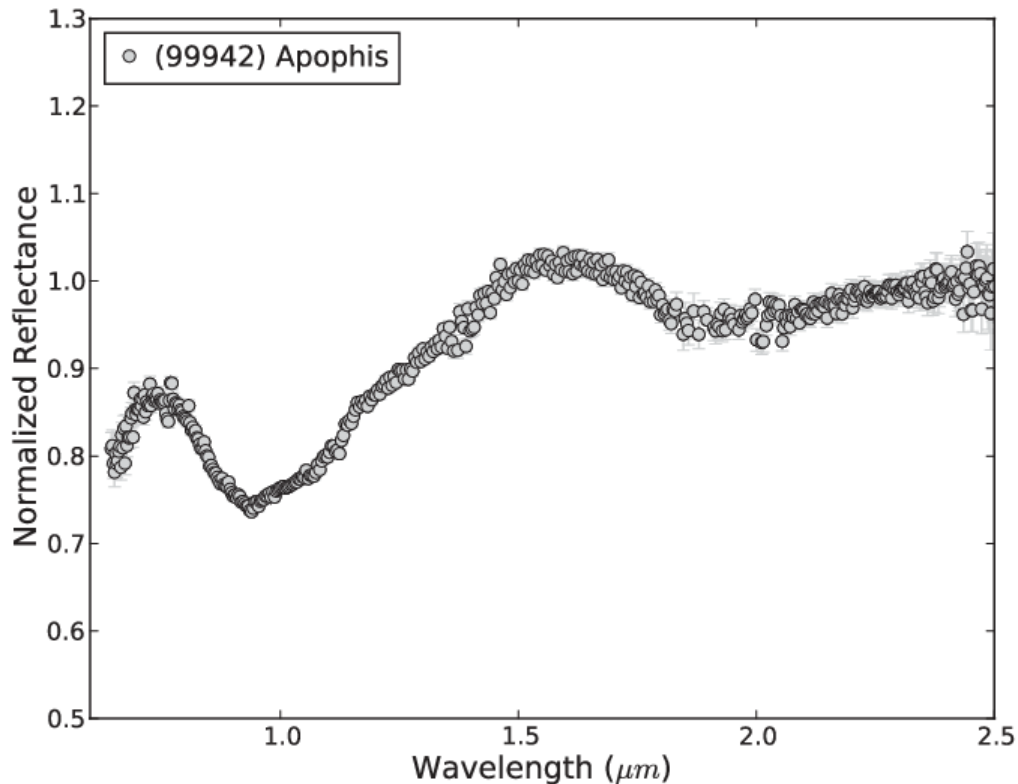


Figura 2.3: Lo spettro di Apophis. Sono evidenti i due assorbimenti a 1 μm e 2 μm . (Credit: Reddy et al., 2018)

2.2 Storia delle osservazioni

Apophis, inizialmente noto con la designazione provvisoria 2004 MN4, fu scoperto il 19 giugno 2004 dall'osservatorio di Kitt Peak (Tucson, Arizona) da Roy Tucker, David Tholen e Fabrizio Bernardi. Il nuovo oggetto venne osservato solo per due giorni, dopo di che venne perso a causa di condizioni metereologiche sfavorevoli.

L'asteroide venne riscoperto il 18 dicembre dello stesso anno da Gordon Garradd, dall'osservatorio di Siding Spring in Australia. Ulteriori osservazioni permisero di confermare che l'oggetto era lo stesso osservato in precedenza a giugno.

Il 23 dicembre, sulla base di una settantina di osservazioni, venne determinata un'orbita preliminare per l'oggetto, che risultò avere una probabilità dell'1.6% di impattare con la Terra nel 2029. Apophis venne quindi classificato come di livello 2 sulla scala Torino, diventando il primo asteroide della storia a superare il livello 1 [21].

Il 27 dicembre fu calcolata una nuova orbita basandosi sulle nuove osservazioni disponibili. La probabilità di impatto salì al 2.7%. Contemporaneamente il diametro dell'asteroide fu determinato essere 390 metri. In base a questi dati, Apophis fu classificato di livello 4 sulla scala Torino.

Nello stesso giorno vennero trovate alcune immagini in cui compariva Apophis risalenti al 15 marzo 2004, prima della sua scoperta. Grazie a questi dati fu possibile determinare con più accuratezza l'orbita dell'asteroide. Venne determinato che nel 2029 Apophis sarebbe passato a sole poche decine di migliaia di km dalla superficie terrestre, ma la probabilità di impatto venne ridotta a zero.

L'errore sulla distanza di transito rimaneva però ancora molto grande: esisteva ancora la possibilità che Apophis sarebbe passato all'interno di un *gravitational keyhole*, non più largo di 800 metri. Attraversando questa regione l'orbita dell'asteroide sarebbe infatti stata perturbata in maniera tale da portarlo a collidere con la Terra nel 2036. Per questo motivo inizialmente fu possibile classificare come di livello zero sulla scala Torino solo il passaggio del 2029, mentre tutti quelli successivi rimanevano di livello uno.

Grazie ad ulteriori osservazioni, nell'agosto 2006 fu possibile ridurre l'incertezza sulla distanza di transito nel 2029 e quindi escludere ogni possibilità di impatto per il passaggio del 2036. Osservazioni radar condotte tra il 2011 e il 2013 mostravano però che esisteva una probabilità non nulla di impatto per il 2068 [6].

L'asteroide dopo il 2015 non è stato più osservato a causa della sua ridotta distanza angolare dal Sole, fino a quando non venne riscoperto nel dicembre 2019.

La campagna osservativa svoltasi tra l'inizio del 2020 e il 2021 ha visto coinvolti più di 40 gruppi di ricerca internazionali, oltre a un vasto numero di astrofili provenienti da ogni parte del mondo. Queste osservazioni hanno permesso di ottenere risultati eccezionali. In particolare la determinazione dell'accelerazione dovuta all'effetto Yarkovsky ha permesso di migliorare notevolmente la precisione sulla sua traiettoria orbitale, riducendo l'incertezza sulla distanza del transito del 2029 da diverse centinaia di chilometri a solo pochi chilometri. Ciò ha permesso di escludere qualsiasi possibilità di collisione tra Apophis e la Terra per il prossimo secolo.

È stato inoltre possibile determinare con grande precisione le distanze a cui avverranno i prossimi incontri ravvicinati con l'asteroide. Dopo quello di quest'anno, avvenuto a una distanza di 16 milioni di km, Apophis ritornerà nei pressi della Terra nel 2029, quando transiterà a soli 31.900 km dalla superficie del nostro pianeta. I passaggi seguenti avverranno invece nel 2036 (MOID = 0.31 UA), nel 2051 (MOID = 6.2 milioni di km) e nel 2066 (MOID = 10.5 milioni di km)².

2.3 Passaggio del 2029

Il 13 aprile del 2029 alle 21:46 UT Apophis sorvolerà la Terra ad un'altezza di soli 31900 km, inferiore a quella che separa i satelliti geostazionari dalla superficie.

Grazie alla campagna osservativa del 2020/2021 è stato possibile determinare con grandissima accuratezza l'esatta distanza a cui transiterà Apophis: l'incertezza residua è di soli 2.6 km ed è dovuta principalmente all'effetto Yarkovsky.

È incredibilmente raro che un asteroide come Apophis sorvoli la Terra a una distanza così ravvicinata. Dal 1908, anno in cui si è verificato l'evento di Tunguska, nessun asteroide di dimensioni paragonabili a quelle di Apophis è infatti transitato a una distanza inferiore alla metà di quella Terra-Luna.

Il sorvolo del 2029 sarà quindi un'opportunità unica per ottenere dati scientifici di fondamentale importanza. Nel momento del massimo avvicinamento Apophis apparirà di magnitudine +3.1, visibile perfino ad occhio nudo. L'asteroide raggiungerà una velocità angolare massima di 42°/h e un diametro angolare di circa 2 arcosecondi. L'asteroide inizierà a essere visibile a occhio nudo dall'Australia e si sposterà progressivamente verso ovest, attraversando l'Oceano Indiano. Una volta sopra l'Africa l'asteroide attraverserà l'equatore, passando così dall'emisfero

²<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=Apophis;orb=0;cov=0;log=0;cad=1cad>

australe a quello boreale, diventando visibile dall'Europa. Nel momento del massimo avvicinamento Apophis si troverà sopra l'Oceano Atlantico. In seguito attraverserà gli Stati Uniti, sopra i quali entrerà nell'emisfero diurno, scomparendo alla vista.³

Nel corso del passaggio l'orbita di Apophis verrà fortemente perturbata: l'asteroide passerà da essere un asteroide Aten dal semiasse maggiore di 0.92 UA a uno del gruppo Apollo con semiasse maggiore di 1.1 UA. Studiando la distribuzione delle orbite e delle magnitudini assolute dei NEO (Granvik et al., 2018) [7] è stato possibile predire statisticamente la frequenza di un incontro ravvicinato per oggetti di magnitudine assoluta simile ad Apophis ($H \sim 19$). È stato ricavato che il passaggio del 2029 sarà un evento estremamente raro, che avviene in media una volta ogni 20 mila anni.

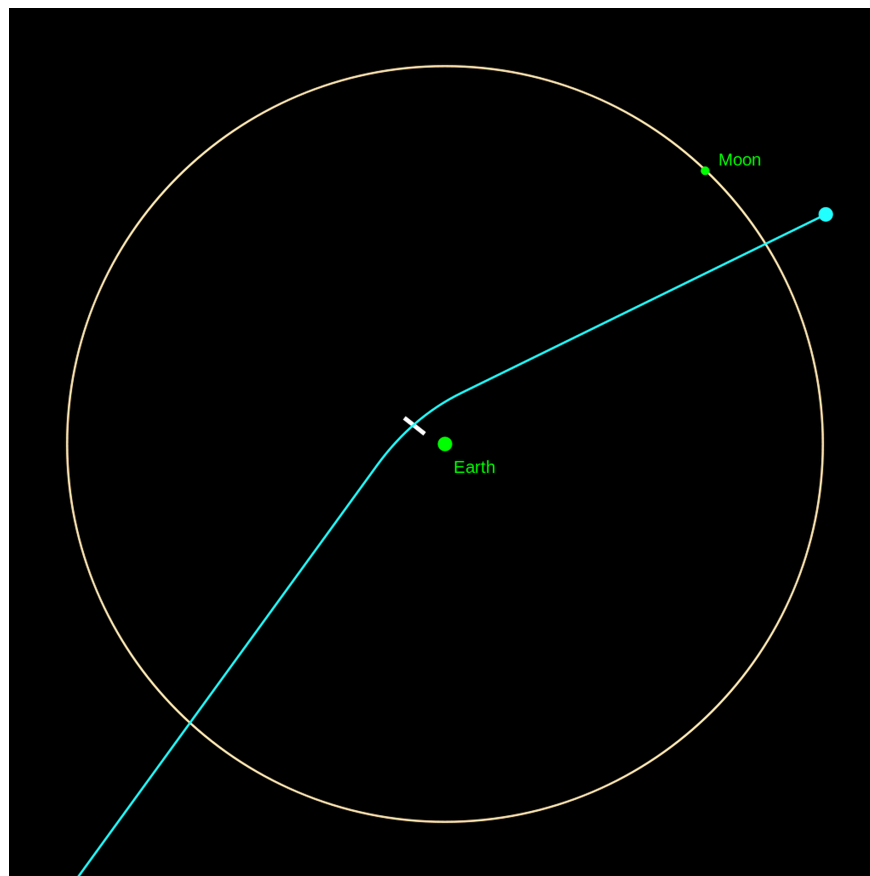


Figura 2.4: La traiettoria che seguirà Apophis durante il passaggio del 2029. (Credit: NASA)

2.4 Potenziali missioni future

Durante il passaggio del 2029 Apophis sarà facilmente osservabile da gran parte della superficie terrestre. È quindi molto probabile che con la strumentazione a terra si riuscirà a determinare la maggior parte delle sue caratteristiche fisiche superficiali. Poco si potrà dire però riguardo alle proprietà della sua struttura interna.

Anche se è stato dimostrato che Apophis ha una probabilità nulla di collisione con la Terra per il prossimo secolo,

³<https://www.youtube.com/watch?v=1PLIAgXjV9o>

è fondamentale cercare di raccogliere la maggior quantità di dati possibili per le generazioni future in caso la sua orbita venga perturbata e diventi pericolosa. Il passaggio del 2029 sarà inoltre un'opportunità unica per la comprensione e lo studio di tutti i PHA.

Ad oggi sono state proposte alcune potenziali missioni che potrebbero raggiungere Apophis nel 2029. Le due proposte più significative sono Apophis Express e un'estensione della missione di OSIRIS-REx.

2.4.1 Apophis Express

Proposta da Jean-Yves Prado, Daniel Hestroffer e Alain Herique [28], la missione prevede di lanciare una sonda nel marzo del 2029 che dovrebbe raggiungere l'asteroide pochi giorni prima che passi alla minima distanza da Terra.

Per incontrare Apophis la missione dovrebbe essere lanciata su un'orbita altamente ellittica, con un apogeo compreso tra 1 e 2 milioni di km. Il piano di quest'orbita deve essere identico a quello dell'orbita dell'asteroide, inclinato di -30° rispetto al piano equatoriale. Date queste premesse, dal momento del lancio Apophis Express impiegherebbe tre settimane a raggiungere l'asteroide.

La velocità relativa tra la sonda e Apophis dovrebbe essere di circa 6 km/s: la sonda necessita quindi di un modulo (Apogee Kick Module) in grado di fornire questa differenza di velocità.

La missione dovrebbe essere costituita da una serie di moduli:

- Apogee Kick Module (AKM), attivato nelle fasi iniziali della missione, fornisce la $\Delta V \sim 6$ km/s necessaria ad inserire Apophis Express sulla corretta traiettoria orbitale.
- Service Module (SM), svolge da collegamento tra il centro di operazione a terra e i vari moduli che costituiscono la missione.
- Orbit Module (OM), potrebbe essere un nanosatellite o un CubeSat da inserire in orbita attorno ad Apophis per studiarne la superficie.
- un lander, equipaggiato con strumenti in grado di sondare la struttura interna dell'asteroide. Potrebbe portare con sé anche un Laser Reflector che permetterebbe di seguire Apophis anche a grandi distanze da Terra. In base al carico scientifico disponibile il lander potrebbe essere dotato di una capsula di rientro, in grado di riportare sulla Terra campioni di materiale superficiale.

Per una migliore progettazione della missione verranno richiesti studi più specifici sulla capacità dei diversi lanciatori. Si stima che circa l'85 % della massa totale della missione venga assorbita dall'Apogee Kick Motor. La massa degli strumenti scientifici varia in base al lanciatore scelto, da 56 kg per il Soyuz FG fino a 260 kg per la versione più potente dell'Ariane.

Rispetto alle missioni tradizionali, Apophis Express presenta diversi vantaggi. Essendo una missione di corta durata i costi sono decisamente minori. Inoltre la sonda si troverebbe sempre a breve distanza dalla Terra: ciò permette di semplificare la progettazione, in particolare riguardo al sistema di comunicazione. Mancano poco meno di otto anni alla potenziale data di lancio: ciò permetterebbe di sviluppare i moduli senza fretta. Le fasi principali della missione si svolgerebbero inoltre in concomitanza con il momento del massimo avvicinamento,

quando l'attenzione dei mass media e del pubblico è massima.

Apophis Express non può però essere pensata come una missione a sé stante. Essendo una missione di breve durata non si avrebbe infatti il tempo necessario per scegliere un luogo di atterraggio adatto al lander. Tale scelta dovrebbe invece essere presa sulla base dei dati ottenuti in precedenza da altre missioni.

2.4.2 OSIRIS-REx

Questa seconda proposta prende in considerazione un'estensione della missione OSIRIS-REx [9]. Dopo aver passato due anni in orbita attorno al NEO Bennu la sonda è attualmente in viaggio verso Terra con dei campioni di materiale prelevati dalla superficie dell'asteroide. La missione primaria di OSIRIS-REx terminerà nel settembre 2023 quando la capsula con i campioni rientrerà in atmosfera.

Dopo questa data i parametri orbitali della sonda saranno favorevoli ad un'estensione della missione che la porterebbero ad incontrare Apophis il 21 aprile 2029, una settimana dopo il momento di massimo avvicinamento alla Terra.

Dato che Bennu e Apophis presentano circa le stesse dimensioni e lo stesso campo gravitazionale si ritiene che tutta la strumentazione scientifica presente a bordo della OSIRIS-REx potrà essere usata per lo studio del PHA. Inoltre, dopo il passaggio del 2029, i parametri dell'orbita di Apophis verranno modificati diventando simili a quelli di Bennu. La sonda si troverà quindi ad operare nelle stesse condizioni ambientali per cui è stata progettata.

Una volta raggiunto Apophis la OSIRIS-REx potrebbe usare i suoi strumenti (laser, spettrometri, ecc) per studiare la topografia, la mineralogia e la composizione della superficie. La sonda sarà in grado anche di misurare con grande precisione l'effetto Yarkovsky che agisce sull'asteroide, permettendo così di determinare accuratamente la sua orbita futura. Inoltre raggiungere l'asteroide in seguito al momento di massimo avvicinamento permetterebbe di studiare i suoi cambiamenti strutturali e superficiali in seguito alle forze mareali esercitate dalla Terra.

L'occasione unica di studiare con la stessa strumentazione un asteroide di tipo S come Apophis e uno di tipo C come Bennu permetterebbe di effettuare un paragone diretto tra due corpi così diversi tra loro, fornendo importanti indizi sulla varietà compositiva tra la popolazione dei NEO.

La vera grande differenza tra Bennu e Apophis riguarda la loro albedo globale. La strumentazione di OSIRIS-REx è infatti stata progettata per lavorare su un oggetto che riflette appena il 4,4% della luce che lo colpisce, mentre su Apophis la percentuale di luce riflessa su scala globale è del 33%. Un'albedo più alta aumenta il rapporto segnale/rumore delle immagini. Si ritiene che lavorando sui tempi di esposizione si riuscirà a ridurre la sfocatura delle immagini anche alle più alte risoluzioni, ottenendo dati della stessa qualità di quelli ottenuti per Bennu.

3. Acquisizione, riduzione e analisi dei dati

3.1 Acquisizione delle immagini

I dati in seguito presentati sono stati ottenuti con il telescopio Copernico a Cima Ekar (Asiago) nel corso della notte del 16 aprile 2021. Come spettrografo è stato utilizzato AFOSC equipaggiato con un grism VPH6, che copre l'intervallo di lunghezze d'onda tra 4500 Å e 11000 Å. AFOSC è dotato di un CCD di ultima generazione che produce delle immagini attive di dimensioni di 2048 x 2048 pixel. All'inizio e al termine dell'immagine lungo l'asse x sono presenti due colonne larghe 20 pixel ciascuna dette regioni di overscan. Queste permettono di leggere il rumore di fondo del sensore e possono essere usate alternativamente al bias. L'apertura della slit al momento dell'osservazione era di 1.69 arcsec, a cui corrisponde, con il grism utilizzato, una risoluzione spettrale di 500.

Apophis è stato iniziato ad osservare alle 19:20:34 UTC e l'esposizione ha avuto una durata di 2700 secondi. Al momento del puntamento le coordinate di Apophis erano AR 10:16:19 e DE +73:24:01. La sua magnitudine apparente era +18.2.

Ad inizio esposizione l'asteroide si trovava a 54.82° di altezza sopra l'orizzonte, a cui corrisponde un'airmass di 1.22. L'airmass è definita come la quantità di aria lungo la linea di vista quando si osserva un oggetto al di fuori dell'atmosfera.

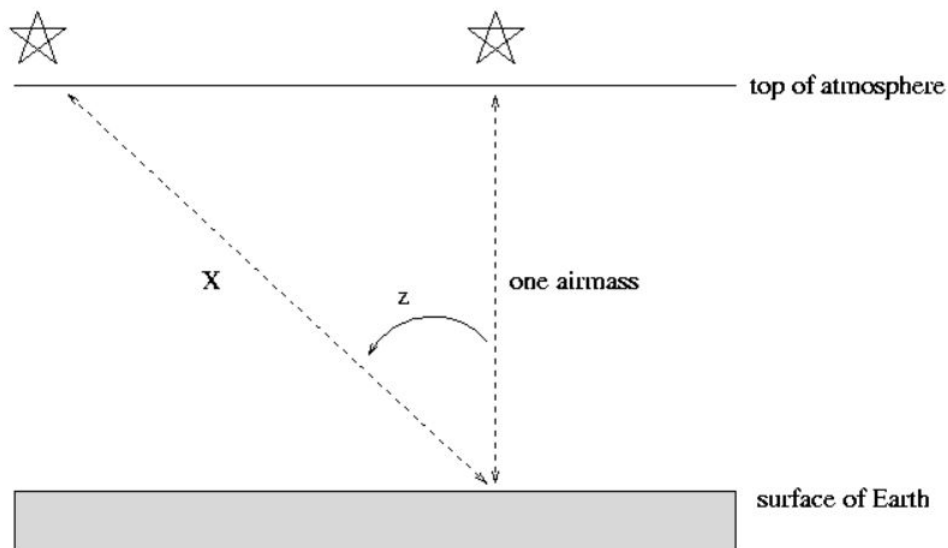


Figura 3.1: Schema che descrive l'airmass. (Credit: M. Richmond, RIT)

Un raggio di luce attraversando gli strati atmosferici viene infatti assorbito e scatterato. Più lo strato da attraversare è spesso più importante è questa attenuazione (detta **estinzione atmosferica**). Oggetti vicino all'orizzonte appariranno pertanto meno luminosi di oggetti vicini allo zenith.

Per definizione, osservando allo zenith l'airmass è 1. Alle altre direzioni l'airmass dipenderà dalla distanza dallo

zenith a cui si sta osservando. Nello schema di fig. 3.1, l'airmass alla distanza X è definita come $airmass\ X = 1 / \cos(z)$. Per l'osservazione di Apophis si trova sostituendo $airmass = 1 / \cos(90^\circ - 54.82^\circ) = 1.22$.

Nel corso della notte oltre alla posa di Apophis sono state ottenute le immagini di flat, una posa della lampada e una dell'analogo solare.

I flat permettono di correggere le disomogeneità di sensibilità del CCD. A Cima Ekar i flat vengono ottenuti prendendo una breve posa di uno schermo bianco collocato sulla parete interna della cupola. Per ridurre i dati in seguito descritti sono stati presi cinque flat dall'esposizione di 2 secondi ciascuno.

Gli asteroidi non emettono radiazione: la loro luminosità è solamente dovuta alla luce del Sole che viene riflessa dalla loro superficie. Gli spettri degli asteroidi avranno quindi una forma molto simile a quella dello spettro solare. Per studiarne il tipo tassonomico è pertanto necessario rimuovere il contributo solare. Data l'impossibilità di prendere lo spettro solare nelle medesime condizioni di osservazione dell'asteroide si utilizza una stella di classe spettrale uguale a quella del Sole, detta analogo. L'analogo viene osservato quando si trova ad un'altezza sopra l'orizzonte circa uguale a quella a cui si trova l'asteroide. In questo modo le condizioni di osservazione (ad esempio assorbimento atmosferico) sono uguali. L'analogo utilizzato è stato SA 102-1081 (AR 10:57:04, DE -00:13:12), di magnitudine apparente +9.9. Essendo molto brillante è stata sufficiente un'esposizione di 120 secondi.

Per la calibrazione in lunghezza d'onda è stata presa una posa di 90 secondi di una lampada Hg-Cd. Questa, tramite delle reazioni tra il mercurio e il cadmio, produce delle linee spettrali monocromatiche molto intense a lunghezze d'onda note. In particolare viene utilizzata la regione tra 3600 e 10000 Å, dove sono presenti circa 20 righe. La calibrazione della posa della lampada permette di produrre una funzione che converte da pixel a lunghezza d'onda la scala delle altre immagini.

3.2 Riduzione dati

La posa di Apophis così come è stata ottenuta al telescopio Copernico non può essere utilizzata per analisi scientifiche, ma deve essere ridotta affinché ne venga estratto lo spettro. Per questo motivo nel corso della notte sono state prese le immagini di flat, della lampada e dell'analogo, che complessivamente sono note come immagini di calibrazione. Schematicamente i passaggi da seguire per la riduzione dati sono:

1. sottrazione del bias;
2. correzione per flat field;
3. calibrazione in lunghezza d'onda;
4. estrazione dello spettro;

3.2.1 Sottrazione del bias

I bias sono immagini che si ottengono con otturatore chiuso e con tempo di posa di zero secondi, in modo tale che non ci sia nessuna luce che raggiunga il sensore CCD. Queste immagini permettono di identificare il livello zero del CCD. I conteggi contenuti nei bias sono dovuti solamente ad effetti strumentali e devono essere sottratti alle

immagini scientifiche.

Se non si dispone di immagini di bias si possono analogamente utilizzare le strisce di overscan. Per via della struttura del CCD ogni immagine scientifica presenta ai suoi lati due strisce nere che corrispondono a regioni del sensore dove non arrivano fotoni. Fare una statistica di queste regioni permette quindi di identificare il livello zero del CCD.

Da IRAF è possibile trovare il valore medio dei conteggi dell'overscan e sottrarlo all'immagine relativa. Questo procedimento deve essere ripetuto per ogni immagine.

Le immagini possono poi essere tagliate per rimuovere le strisce di overscan. Su IRAF ciò può essere fatto creando due liste: la prima con le immagini di partenza specificando la regione senza overscan e la seconda con i nomi delle immagini di output. Si copiano poi le immagini tagliate della prima lista all'interno della seconda.

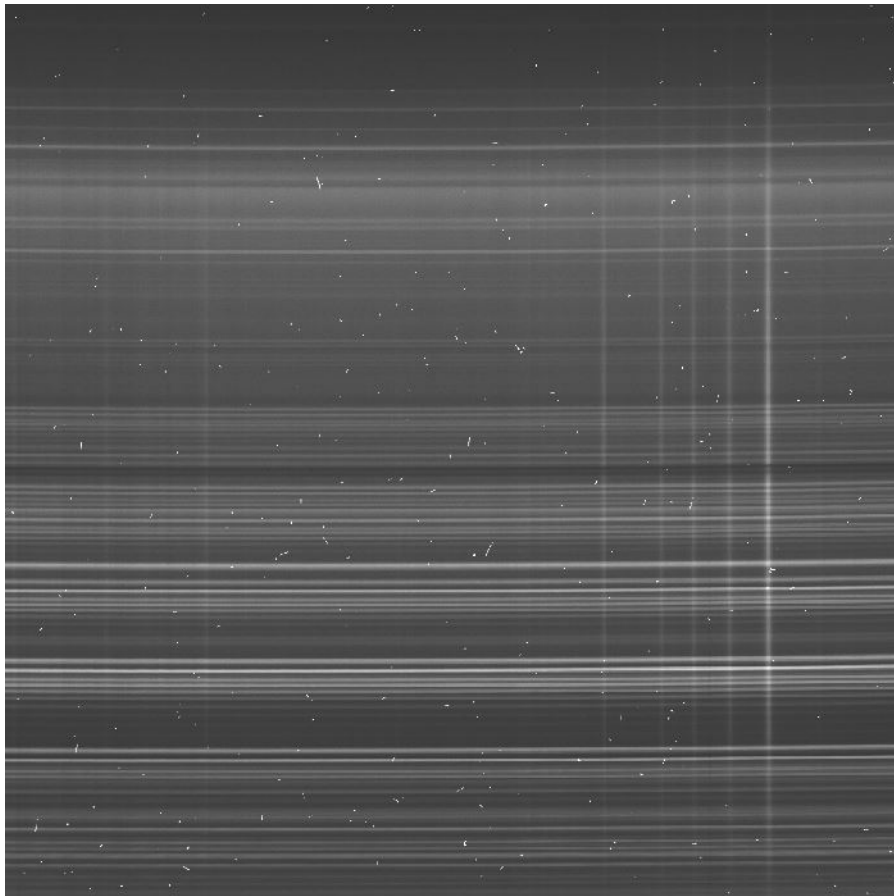


Figura 3.2: La posa di Apophis a cui è stato sottratto il bias e rimosse le strisce di overscan. Le linee orizzontali appaiono incurvate dato che non è ancora stata fatta la calibrazione in lunghezza d'onda. Lo spettro di Apophis è la quinta linea verticale partendo da destra.

3.2.2 Correzione per flat field

In spettroscopia esistono diversi modi per ottenere i flat field. Come detto in precedenza si può sfruttare uno schermo bianco montato sulla parte interna della cupola. I flat si possono poi ottenere prendendo lo spettro di una lampada che emette luce continua e uniforme (solitamente si utilizza una lampada alogena). In questo caso

lo spettro ottenuto sarà una combinazione tra lo spettro della lampada, la curva di risposta del CCD e gli effetti dovuti alla non uniformità dei pixel. Le immagini scientifiche vanno quindi corrette per i flat field, che indicano le disomogeneità di sensibilità dello strumento.

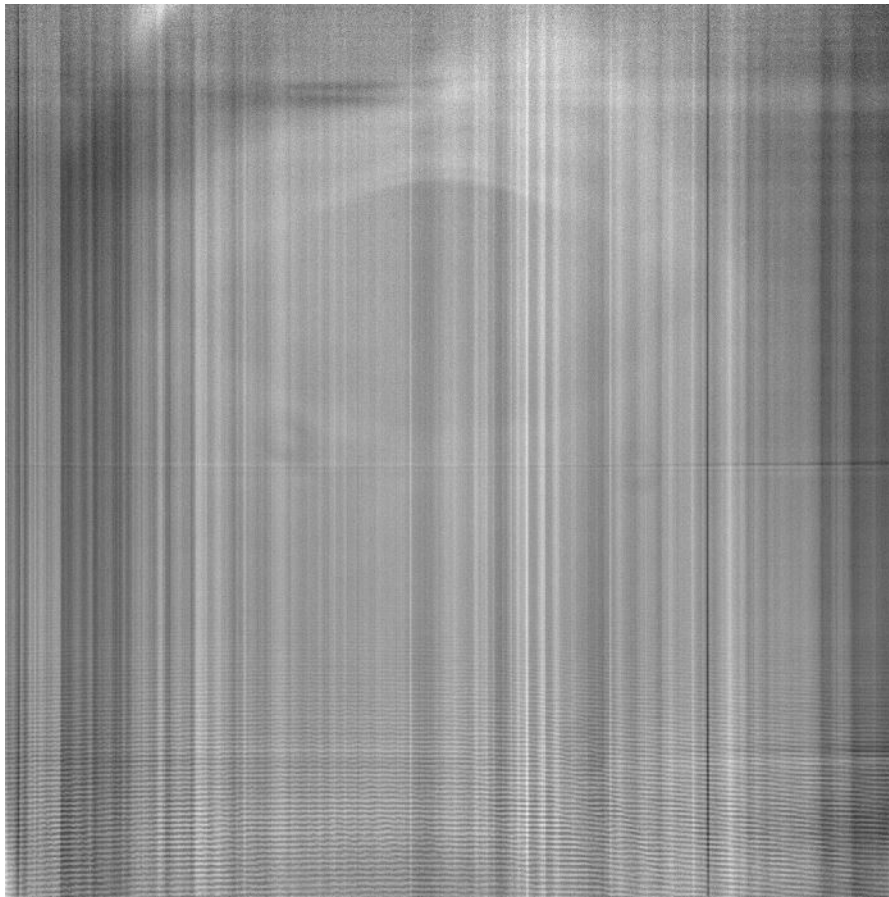


Figura 3.3: Il flat normalizzato.

Nella pratica bisogna unire tra loro i flat ottenuti nel corso della notte, prendendone la mediana (immagine di medflat). Questa deve essere resa monodimensionale e poi replicata per tutta la larghezza lungo l'asse x. Dividendo il medflat per l'immagine appena ottenuta si ottiene il flat normalizzato, chiamato masterflat.

Le pose della lampada, dell'analogo e dell'asteroide devono infine essere divise per il masterflat.

Nella parte bassa del flat normalizzato sono visibili dei disturbi a forma di onda. Questo effetto, noto come **fringing**, è caratteristico dei CCD sottili. A causa del ridotto spessore di questi sensori la luce nella parte rossa dello spettro subisce dei fenomeni di interferenza, che causano queste ondulazioni. Il fringing caratterizza tutte le immagini ottenute. Dividendo queste pose per il flat normalizzato il fringing viene correttamente rimosso senza dover ricorrere a nessun accorgimento particolare.

3.2.3 Calibrazione in lunghezza d'onda

Per le immagini ottenute con il telescopio Copernico la fenditura è orientata lungo l'asse verticale. La calibrazione in lunghezza d'onda permette di passare da pixel a unità fisiche di lunghezza d'onda.

Nel corso della notte è stata presa una posa di una lampada Hg-Cd, di cui si conoscono le lunghezze d'onda delle righe spettrali.

Su IRAF si cerca inizialmente di identificare il maggior numero di righe possibili della posa della lampada confrontandole con quelle di un atlante. Dopo aver inserito la lunghezza d'onda relativa per un certo numero di righe, IRAF riesce autonomamente ad identificare tutte quelle restanti. Si può subito effettuare una verifica dell'accuratezza di tale processo andando a controllare i residui: se questi sono elevati conviene ripetere l'identificazione. Questo permette di calibrare in lunghezza d'onda la colonna centrale dell'immagine; IRAF ripete poi autonomamente il processo per tutta l'estensione orizzontale dell'immagine.

Viene così creata una funzione che per ogni punto dell'immagine permette di passare da pixel a lunghezze d'onda. Questa mappa viene sfruttata per calibrare in lunghezza d'onda la posa della lampada. Se nell'immagine risultante le righe spettrali sono curve allora il processo non è stato accurato e bisogna ripetere la procedura, altrimenti se sono dritte è possibile calibrare con questa mappa anche le pose dell'analogo e dell'asteroide.

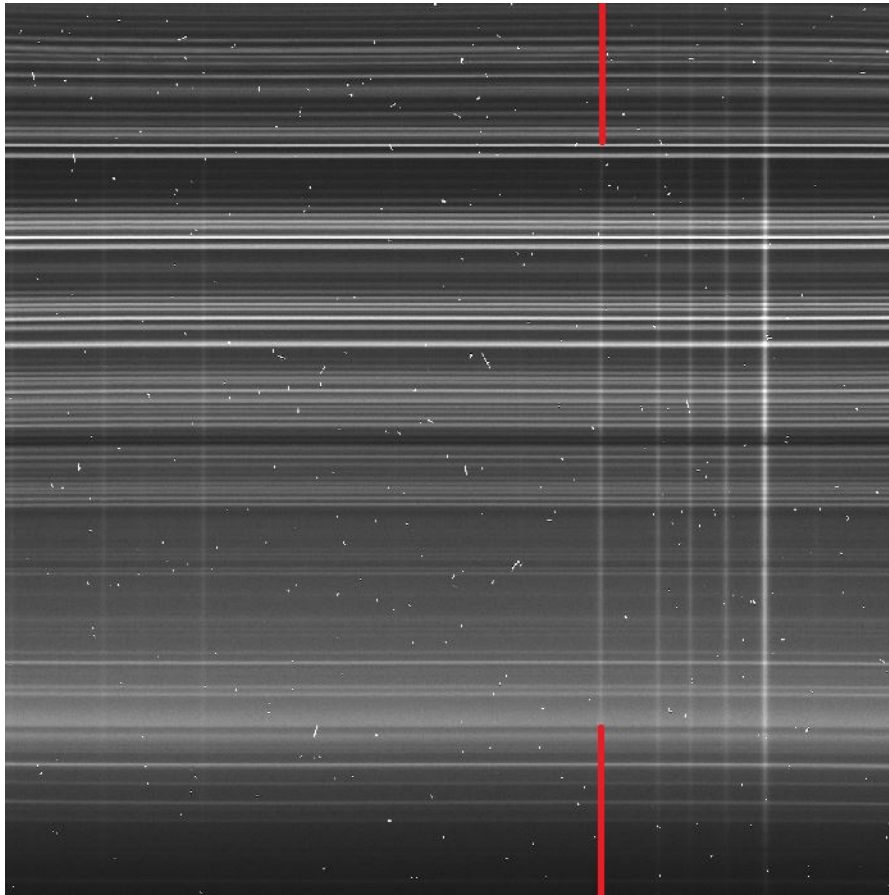


Figura 3.4: La posa di Apophis calibrata in lunghezza d'onda. La posizione dello spettro di Apophis è segnato dai due tratti rossi.

3.2.4 Estrazione dello spettro

La fig. 3.4 è caratterizzata da tre componenti: le righe verticali, le righe orizzontali e dei gruppi di pixel sparsi casualmente per tutta l'immagine.

Le righe orizzontali sono emissioni prodotte dai gas atmosferici. Possono essere sfruttate per capire se la procedura di calibrazione in lunghezza d'onda è stata svolta accuratamente: se queste righe sono ancora incurvate bisogna ripetere il processo.

I gruppi di pixel bianchi si trovano invece in corrispondenza delle regioni di CCD che sono state colpite da **raggi cosmici**. Questi sono costituiti da particelle molto energetiche provenienti dallo spazio esterno ed emesse nel corso di fenomeni molto energetici quali quasar ed esplosioni di supernove. La maggior parte dei raggi cosmici viene bloccata dall'atmosfera. Alcuni riescono però a penetrarla e ad arrivare sulla superficie terrestre, dove possono incidere sul CCD. Nelle immagini i raggi cosmici vengono facilmente riconosciuti in quanto la loro forma è diversa da quella dei tipici oggetti astronomici osservati, come stelle, galassie, ecc.

Attraverso una serie di comandi, IRAF è in grado di rimuovere autonomamente tutti i raggi cosmici che trova nell'immagine. Ciò non viene fatto nel corso di questa riduzione dati, dato che di tutta l'immagine l'unica parte che verrà analizzata sarà solo la colonna relativa allo spettro di Apophis ed è molto improbabile che cadano dei raggi cosmici esattamente in questa posizione. Nel caso invece ne fossero arrivati alcuni allora verranno rimossi in seguito durante l'analisi dello spettro tramite un procedimento manuale.

Le righe verticali sono invece gli spettri degli oggetti passati in fenditura nel corso dell'esposizione. Secondo la procedura che si segue al telescopio Copernico, lo spettro dell'asteroide si trova sempre intorno al pixel 680 lungo l'asse x, indicata dai due tratti rossi in fig. 3.4. Nella riduzione dati seguente bisogna prestare attenzione a selezionare lo spettro corretto: se per caso si sbagliasse e si considerasse uno spettro errato, non ce ne si accorgerebbe fino al termine della procedura. Nel caso dell'immagine dell'analogo è presente un unico spettro verticale e in questo caso è impossibile confondersi.

IRAF tramite una serie di comandi permette sia di stimare il contributo del fondocielo sia di estrarre lo spettro dell'analogo e dell'asteroide dalle rispettive pose.

I due spettri estratti vanno in seguito corretti per l'estinzione atmosferica presente a Cima Ekar. Dando come input una tabella contenente per ogni lunghezza d'onda l'assorbimento atmosferico relativo, IRAF corregge automaticamente entrambi gli spettri.

Dividendo infine lo spettro dell'asteroide per quello dell'analogo si rimuove il contributo solare e si ottiene lo spettro finale ridotto dell'oggetto.

Nello spettro finale in fig. 3.5 inizia ad essere riconoscibile una forma spettrale ben definita, che però è rovinata da alcune imperfezioni, dette spikes, che si estendono di molto oltre la larghezza verticale dell'immagine. Le spikes non hanno un significato fisico e sono ad esempio dovute a raggi cosmici o ad errori nella pulitura dello spettro. Per rimuovere queste imperfezioni si convertono i tre spettri ottenuti in dei file di testo, da analizzare poi in Matlab. Tali file di testo riportano per ogni lunghezza d'onda il relativo numero di conteggi. Analizzando ad esempio il file relativo allo spettro diviso di Apophis si nota che sono presenti alcune lunghezze d'onda a cui sono associati conteggi negativi o che si discostano di molto dalla media. Queste righe sono quelle associate agli spikes: rimuovendole prima di analizzare lo spettro in Matlab si eliminano le imperfezioni.

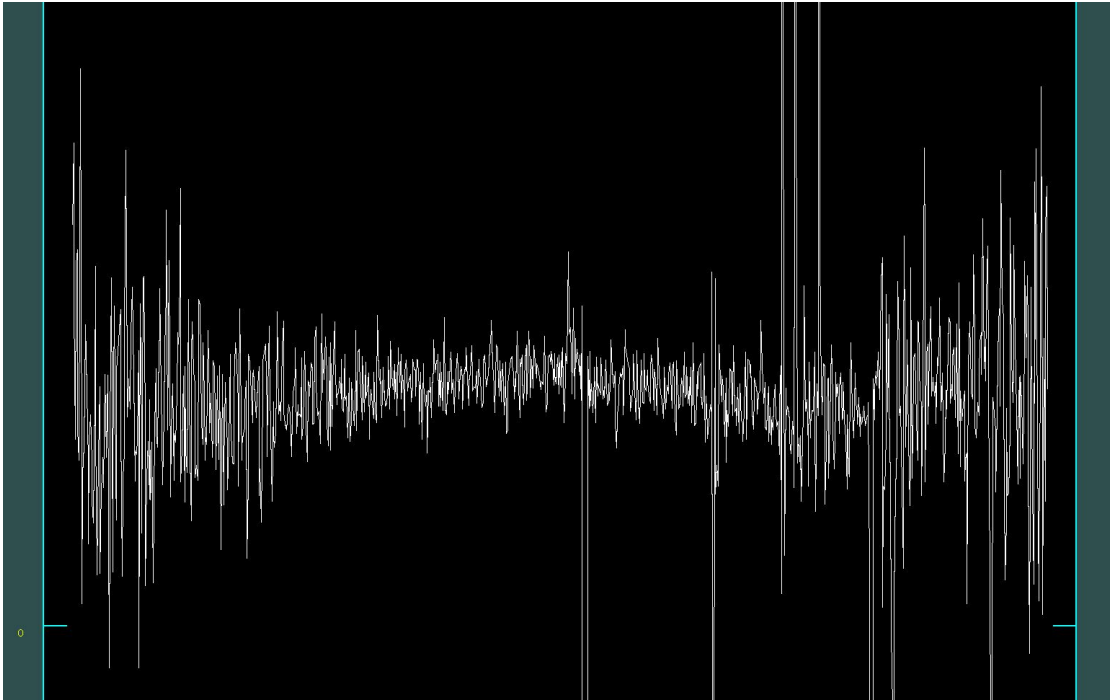


Figura 3.5: Lo spettro finale di Apophis.

3.3 Analisi dei dati

Dopo aver rimosso gli spikes (se presenti) dai file di testo è ora possibile graficare in Matlab gli spettri dell'analogo, di Apophis prima della divisione per l'analogo e di Apophis finale.

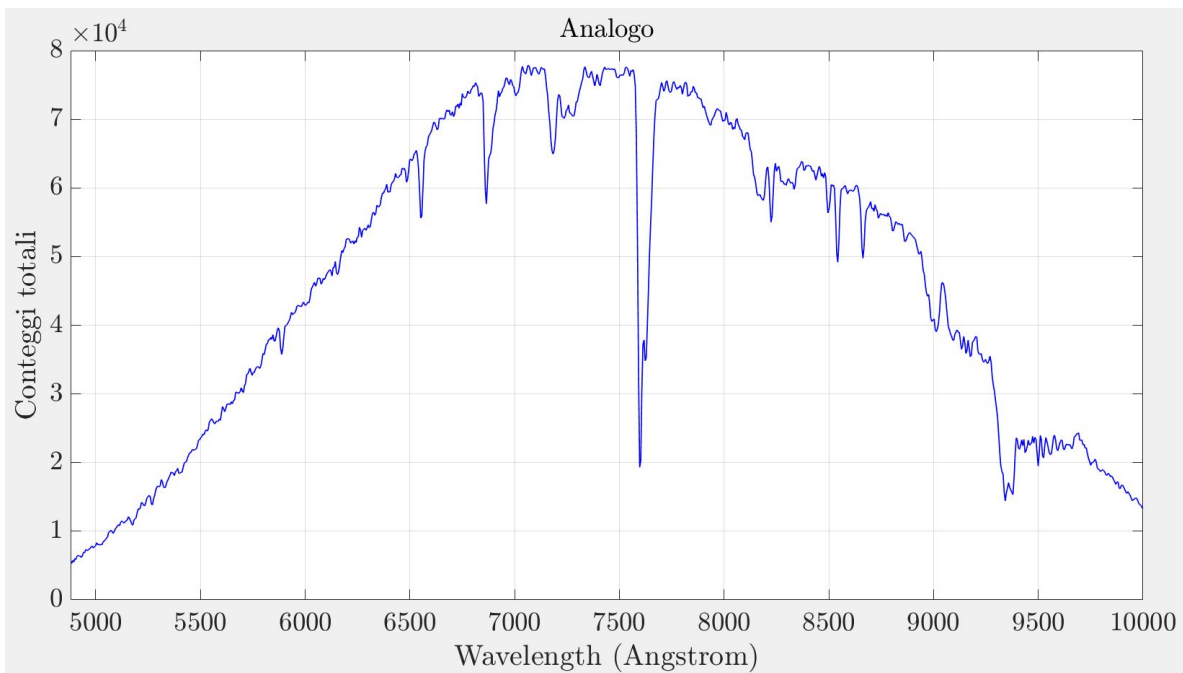


Figura 3.6: Lo spettro dell'analogo.

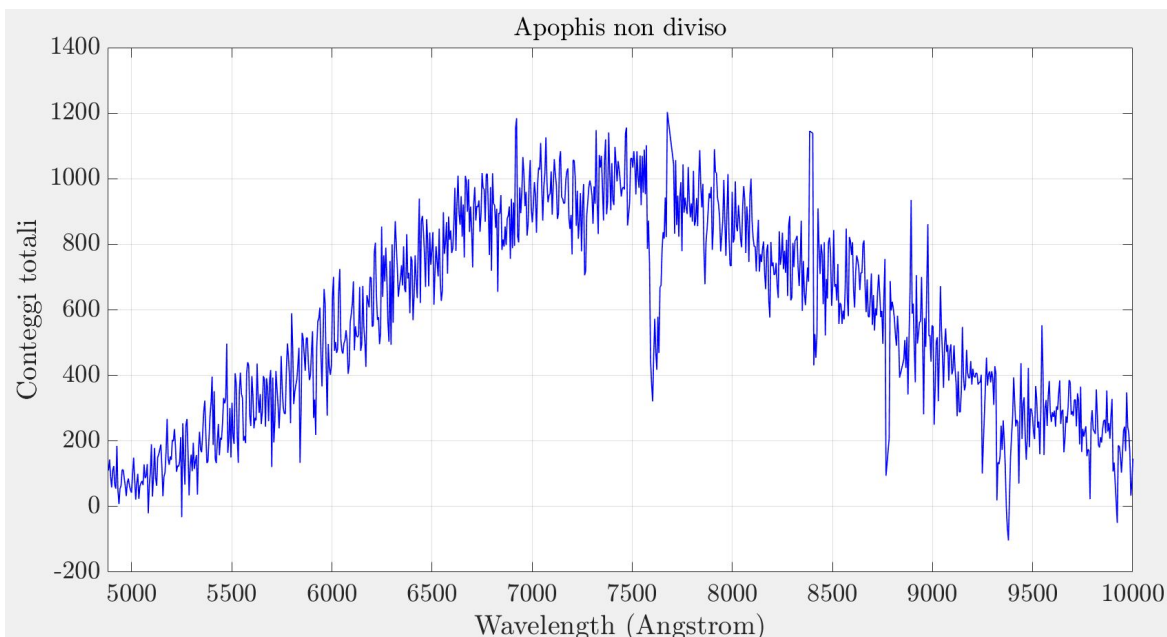


Figura 3.7: Lo spettro di Apophis precedente alla divisione per l'analogo solare.

Sia lo spettro dell'analogo che quello di Apophis non diviso presentano la forma caratteristica dello spettro solare. Ciò è ovvio per quanto detto in precedenza: l'analogo è infatti una stella di classe spettrale uguale a quella solare, mentre la superficie dell'asteroide riflette la luce solare, che di conseguenza è la componente principale del suo spettro.

Si nota che lo spettro di Apophis è molto più rumoroso di quello dell'analogo. Ciò è dovuto al fatto che l'asteroide era molto meno luminoso dell'analogo, come d'altronde si può vedere dai conteggi riportati lungo l'asse y.

Da questi due spettri si possono inoltre studiare le bande di assorbimento atmosferiche, situate a quelle lunghezze d'onda in cui si ha una netta riduzione dei conteggi. Le bande sono dovute a gas atmosferici che assorbono la radiazione elettromagnetica ad una specifica energia, mentre fanno passare indisturbata quella alle altre lunghezze d'onda.

Le principali bande di assorbimento in questi spettri sono quella dell'O₂ a 7650 Å e quella dell'acqua tra i 9000 Å e i 9500 Å. Queste due bande essendo così profonde sono estremamente difficili da eliminare e molto spesso rimangono dei residui anche nello spettro finale ridotto. Idealmente sarebbero rimuovibili acquisendo le immagini dell'oggetto e dell'analogo nello stesso momento e nella stessa direzione di cielo, in modo da avere la stessa air-mass (e quindi lo stesso assorbimento).

Dividendo tra loro i due spettri sopra riportati si elimina il contributo solare e si ottiene lo spettro finale di Apophis ridotto (in blu in fig. 3.8).

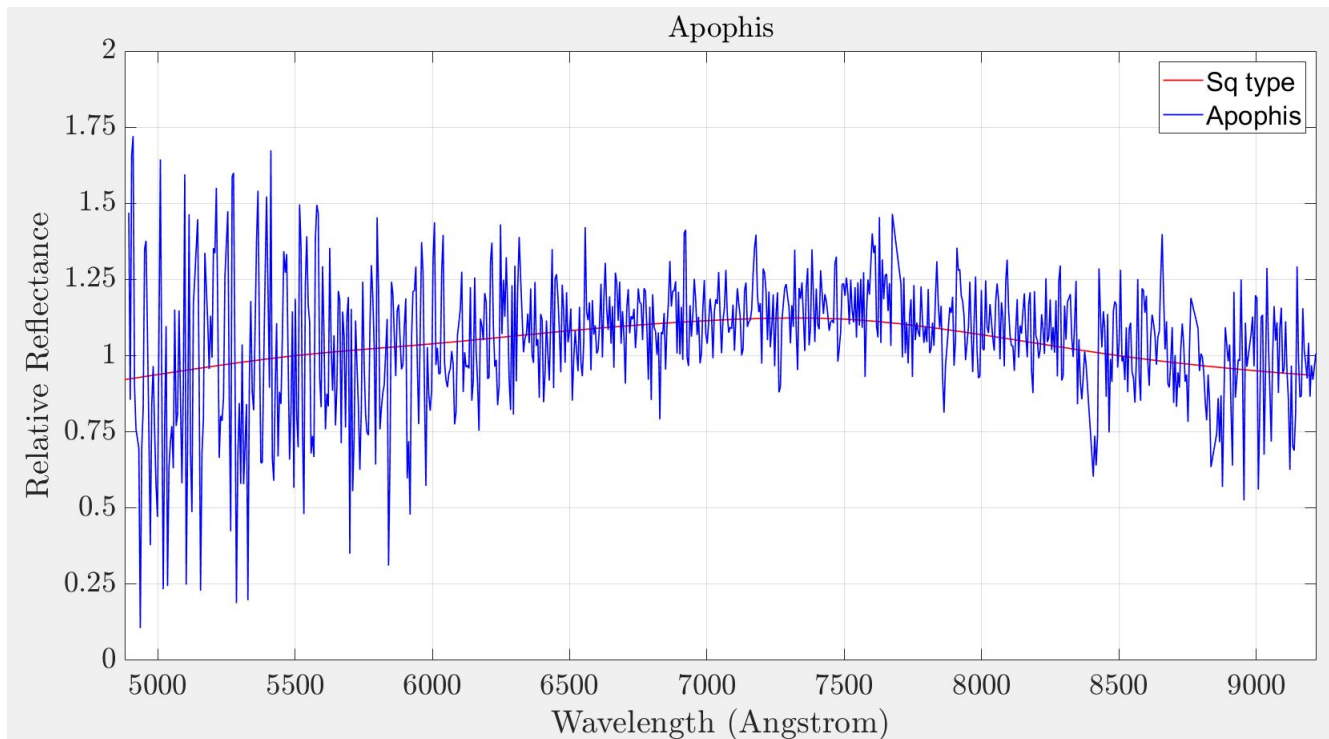


Figura 3.8: Lo spettro ridotto di Apophis (in blu) e lo spettro standard di un asteroide di tipo Sq (in rosso).

Come da convenzione, lo spettro è stato normalizzato ad uno alla lunghezza d'onda di 5500 Å.

Lo spettro è molto rumoroso, ma è compatibile con uno spettro di tipo S secondo la classificazione di Tholen e uno di tipo Sq (linea rossa) secondo la classificazione di Bus e Binzel. Questi risultati sono in accordo con le osservazioni di Binzel et al. (2009) [3] e di Reddy et al. (2018) [17], che trovano un tipo spettrale Sq. I dati sono compatibili anche con lo spettro di Apophis ottenuto il 17 gennaio 2013 nel corso della survey MITHNEOS¹.

Lo spettro è caratterizzato da un picco intorno alle 7500 Å e da una diminuzione della riflettività oltre questa lunghezza d'onda. Ciò è consistente con un oggetto costituito da una base di silicati, in particolare da un mix di olivina (ol) e ortopirosseni (px). È qui utile definire il rapporto $ol/(ol+px)$, che permette di caratterizzare la composizione dell'asteroide. Reddy et al. (2018) trovano un rapporto $ol/(ol+px) = 0.63 \pm 0.03$, mentre un valore di 0.66 ± 0.03 è stato determinato dai dati di MITHNEOS. Usando i metodi e le equazioni derivate da Dunn et al. (2010)[5] questo si traduce in una composizione fatta di olivina per il $63 \pm 3\%$ per i dati di Reddy et al. (2018) e per il $66 \pm 3\%$ per quelli di MITHNEOS.

Questi dati sono compatibili tra loro, ma si allontanano da quanto trovato da Binzel et al. (2009), che riportano una composizione fatta da olivina per il $70 \pm 5\%$. Questa differenza è dovuta al fatto che i dati di Binzel et al. (2009) sono stati ridotti quando ancora non erano stati introdotti i metodi descritti da Dunn et al. (2010). Riducendo le osservazioni di Binzel et al. (2009) con le più recenti calibrazioni si trova una composizione fatta per il $60 \pm 3\%$ da olivina, il che è compatibile con gli altri due valori.

Le differenze residue sono dovute al diverso rapporto segnale/rumore dei dati. Le osservazioni di Reddy et al. (2018) e di MITHNEOS sono state condotte quando Apophis appariva di magnitudine apparente +15.9, mentre

¹<http://smass.mit.edu/minus.html>

durante le osservazioni di Binzel la magnitudine dell'asteroide era di +17.4. I dati ottenuti da Reddy et al. (2018) hanno un rapporto segnale/rumore molto più alto di quelli di Binzel et al. (2009) e ciò ha facilitato l'analisi della composizione mineralogica.

Lo spettro di Apophis analizzato in questo lavoro è stato ottenuto quando la sua magnitudine apparente era di +18.2, che implica un rapporto segnale/rumore di molto inferiore sia a quello di Binzel et al. (2009) che di Reddy et al. (2018).

3.3.1 Correlazione con le condriti ordinarie

Di tutte le meteoriti che sono state ritrovate sulla superficie terrestre l'86% sono condriti². Le condriti sono tra le rocce più antiche note, risalenti alla formazione del Sistema Solare, e le abbondanze degli elementi non volatili al loro interno sono molto simili a quelle che si ritrovano nella fotosfera solare [29]. Le condriti prendono il loro nome dalle condrule, delle inclusioni di forma sferica dal diametro dell'ordine del millimetro. Le condrule sono composte da minerali silicati cristallizzati, prevalentemente da olivina e pirosseni, e contengono ferro e nichel metallici. Si ritiene che le condrule siano il materiale solido più antico presente all'interno del Sistema Solare, condensatosi direttamente dai gas della nebulosa primordiale.

Le condriti vengono suddivise in sottogruppi sulla base della loro composizione e della presenza di condrule. Le più comuni sono le **condriti ordinarie**, che rappresentano circa il 90% di tutte le condriti totali.

I componenti principali che costituiscono le condriti ordinarie sono i metalli, l'olivina e i pirosseni, con piccole quantità di altri minerali, tra cui plagiocasio [24].

Le condriti ordinarie sono state suddivise in tre sottogruppi che differiscono tra loro per le diverse proporzioni in cui sono presenti il ferro, i metalli e l'ossido di ferro all'interno dei silicati [19]. Le **condriti H** sono quelle che contengono il maggior contenuto di ferro e di metalli e il minor contenuto di ossido di ferro. Le **condriti LL** viceversa hanno il maggior contenuto di ossido di ferro e la minore quantità di ferro e di metalli. Le **condriti L** sono una via di mezzo tra le H e le LL. Le condriti H ed LL differiscono tra loro anche in termini degli isotopi dell'ossigeno: le LL contengono infatti una quantità misurabile di ¹⁶O, assente nelle H.

In molti casi sono state trovate correlazioni tra gli spettri delle condriti ordinarie e degli asteroidi di tipo S, il che suggerisce che siano i corpi progenitori più probabili per questa classe di meteoriti (Vernazza et al., 2014)[18]. In particolare circa la metà delle condriti H sembra avere un'origine comune, dato che presentano tutte un'età compresa tra i 7 e gli 8 milioni di anni. Un possibile corpo progenitore di queste meteoriti è l'asteroide (6) Hebe (Gaffey e Gilbert, 2010)[27]. Analogamente, i due terzi delle condriti L condividono le stesse proprietà (età, abbondanza degli isotopi di alluminio), il che indica che hanno un'origine in comune. Il corpo progenitore di queste meteoriti non è ancora stato identificato.

²<https://www.nhm.ac.uk/our-science/data/metcat/search/metsPerGroup.dsml>

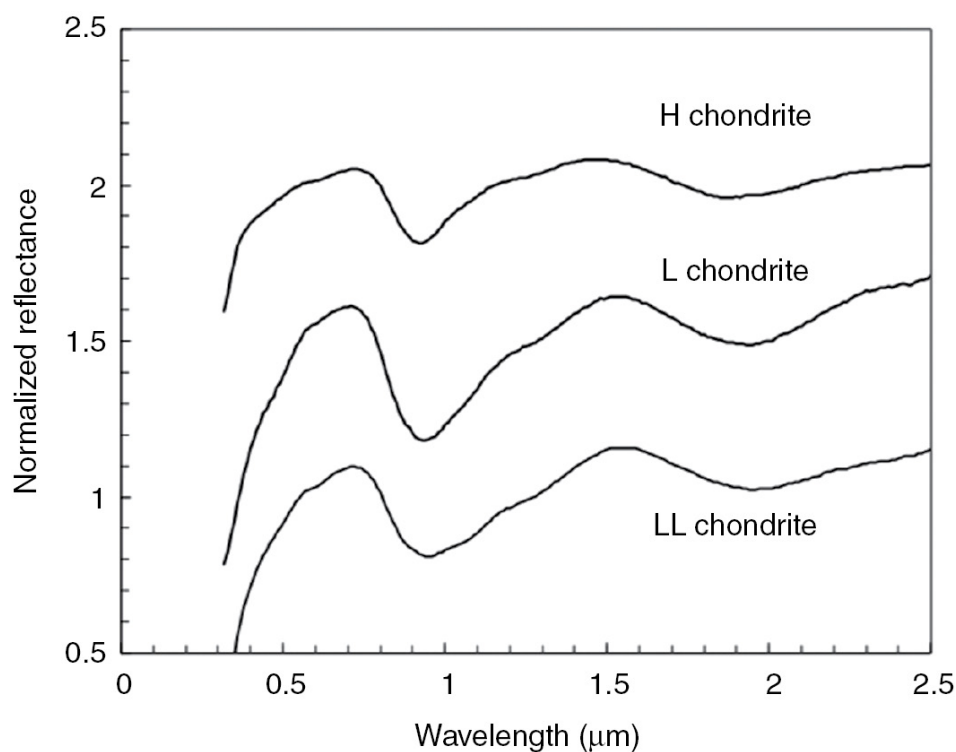


Figura 3.9: Gli spettri dei tre sottogruppi principali delle condriti ordinarie. (Credit: Cambridge University)

Il rapporto $ol/(ol+px)$ definito in precedenza ha permesso di determinare la composizione mineralogica di Apophis. Questo parametro può essere confrontato con quello che si ricava dalle condriti ordinarie per cercare di trovare una correlazione tra Apophis e questa classe di meteoriti.

I dati ricavati da Reddy et al. (2018) indicano che Apophis ha un 89% di probabilità di appartenere alla classe LL e un 11% alla classe L. Le probabilità che si trovano dall'analisi dei dati di MITHNEOS sono invece 86% per la classe LL e 14% per la classe L. Dai dati di Binzel et al. (2009) elaborati con le equazioni di Dunn et al. (2010) si ottiene una probabilità del 98% per la classe LL e del 2% per la L.

I valori dei rapporti $ol/(ol+px)$ possono essere poi combinati con le abbondanze di altri minerali silicati (in particolare della fayalite e della ferrosilite) nella superficie di Apophis e nelle condriti ordinarie. Per tutti i tre set di dati si ricava che Apophis ha una affinità composizionale superiore al 99.5% con le condriti LL.

Alternativamente la similitudine tra Apophis e le condriti ordinarie LL può essere dimostrata attraverso un confronto diretto tra lo spettro dell'asteroide e quello di una meteorite di questa classe.

Per cercare lo spettro di una condrite LL che si adattasse a quello di Apophis è stato utilizzato il database RELAB³, al cui interno sono riportate le proprietà spettrali di tutte le meteoriti ritrovate sulla superficie terrestre.

Dopo una serie di tentativi è stato trovato che la meteorite Jelica presenta un grado di somiglianza molto elevato con lo spettro di Apophis, come mostrato in fig. 3.10.

Jelica è un frammento di un meteorite che l'1 dicembre del 1889 è esploso sopra i cieli della Serbia causando una pioggia di meteoriti su un'area di 8 x 5 km. La composizione mineralogica della meteorite conferma la somiglianza

³http://www.planetary.brown.edu/relabdocs/relab_disclaimer.htm

che si trova dagli spettri: anch'essa come l'asteroide è infatti costituita principalmente da olivina e pirosseni⁴, con tracce di altri minerali silicati.

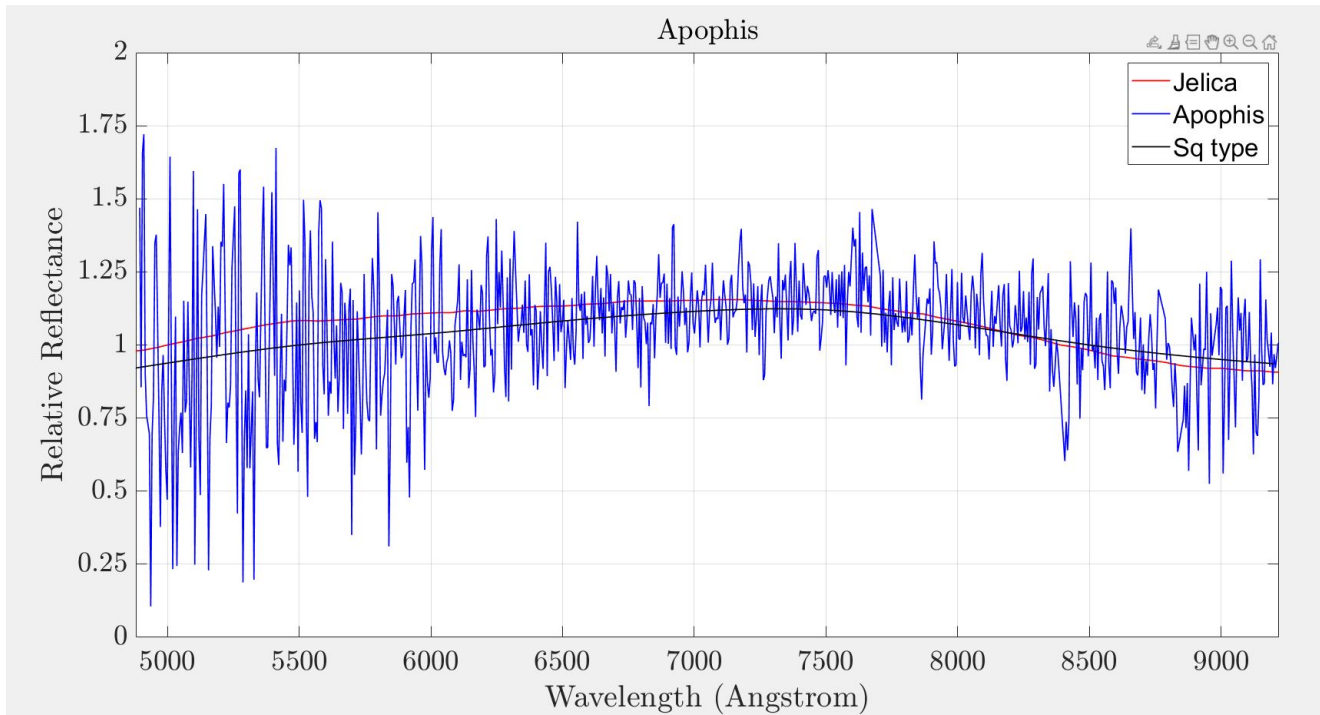


Figura 3.10: Lo spettro di Apophis (in blu) confrontato con quello di un generico asteroide di tipo Sq (in nero) e con quello della meteorite Jelica (in rosso).

Le condriti LL sono state associate alla famiglia Flora, costituita da asteroidi di tipo S in orbita nella parte interna della Fascia Principale, a 2.3 UA di distanza dal Sole (Reddy et. al, 2014)[16]. Si ritiene che i NEO che presentano proprietà simili alle condriti LL siano asteroidi della famiglia Flora trasportati nel Sistema Solare interno tramite la risonanza ν_6 (Nesvorný et al., 2002)[13]. È quindi molto probabile che Apophis sia originario di questa famiglia e che orbitasse nella Fascia Principale interna, nei pressi della risonanza ν_6 .

⁴<https://www.mindat.org/loc-31171.html>

Conclusioni

In questo lavoro mi sono occupato dello studio dei NEO, nell'ambito del progetto europeo NEOROCKS, ed in particolare dell'asteroide potenzialmente pericoloso Apophis, il cui spettro è stato ottenuto nella notte del 16 aprile 2021 dal telescopio Copernico di Cima Ekar, Asiago. Essendo Apophis un ottimo esempio di PHA il suo studio permette di comprendere più a fondo questa classe di oggetti, con importanti ricadute in diversi campi scientifici, in particolare la difesa planetaria.

Le immagini ottenute sono state prima ridotte per bias e flat field e poi calibrate in lunghezza d'onda tramite l'utilizzo della routine IRAF. Dalle pose dell'analogo solare e di Apophis sono stati estratti i relativi spettri, che sono stati corretti per l'estinzione atmosferica. I due spettri sono stati divisi tra loro per ottenere lo spettro finale di Apophis senza il contributo solare. Quest'ultimo è stato poi corretto per le imperfezioni rimanenti, come ad esempio i raggi cosmici, ed è stato poi analizzato in Matlab.

L'analisi dei dati ha permesso di determinare che Apophis appartiene al tipo spettrale S nella classificazione di Tholen e al tipo spettrale Sq nella classificazione di Bus e Binzel. Questo risultato è in accordo con quanto in precedenza trovato da altri gruppi di ricerca, in particolare da Reddy et al. (2018) e Binzel et al. (2009).

Le osservazioni per questo lavoro sono state condotte quando Apophis appariva di magnitudine apparente +18.2, il che ha comportato un rapporto segnale/rumore peggiore di quelli riportati da altri gruppi di ricerca che hanno invece studiato l'asteroide quando era più luminoso. Confrontando quanto riportato in letteratura scientifica è stato possibile ricavare in 0.63 ± 0.03 la stima più probabile per il rapporto $ol/(ol+px)$ per la superficie di Apophis. A questo valore corrisponde una composizione mineralogica superficiale fatta per il $(63 \pm 3) \%$ da olivina e per il restante da ortopirosseni, con tracce di altri minerali silicati come ad esempio clinopirosseni.

Il parametro $ol/(ol+px)$ è stato poi utilizzato per verificare se esistesse una corrispondenza tra Apophis e una qualsiasi classe di meteoriti. Combinando i dati riportati in letteratura con l'abbondanza dei minerali silicati nelle meteoriti e nella superficie dell'asteroide è stato ricavato che Apophis ha un'affinità composizionale superiore al 99.5 % con le condriti ordinarie LL.

Il paragone tra lo spettro di Apophis e quello di Jelica (un esempio di una condrite LL) ha permesso di dimostrare direttamente la corrispondenza tra l'asteroide e questa classe di meteoriti.

Si ritiene che i corpi progenitori di questa classe di meteoriti possano essere gli asteroidi della famiglia Flora, situata nella regione interna della Fascia Principale. Ciò sembra suggerire che Apophis possa essere originario di questa famiglia e che possa poi essere stato trasportato sulla sua orbita attuale attraverso la risonanza di moto medio v_6 .

Bibliografia

- [1] Chesley et al. *Direct Detection of the Yarkovsky Effect by Radar Ranging to Asteroid 6489 Golevka*. Science, volume 302, p. 1739-1742, 2003.
- [2] Binzel et al. *Physical Properties of Near-Earth Objects*. University of Arizona Press, Asteroids III, p. 255–271, 2002.
- [3] Binzel et al. *Spectral properties and composition of potentially hazardous asteroid (99942) Apophis*. Icarus, Volume 200, p. 480–485, 2009.
- [4] Brozovic et al. *Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012–2013*. Icarus, Volume 300, p. 115–128, 2018.
- [5] Dunn et al. *A coordinated spectral, mineralogical, and compositional study of ordinary chondrites*. Icarus, Volume 208, p. 789–797, 2010.
- [6] Farnocchia et al. *Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis*. Icarus, Volume 173, p. 192-200, 2013.
- [7] Granvik et al. *Frequency of Close Earth Approaches by Near-Earth Objects*. Icarus, Volume 312, p. 181–207, 2018.
- [8] Granvik et al. *OpenOrb: Open-source asteroid orbit computation software including statistical ranging*. Meteoritics & Planetary Science, volume 12, p. 1853–1861, 2009.
- [9] Lauretta et al. *OSIRIS-REx at Apophis: Opportunity for an Extended Mission*. Virtual Workshop: Apophis T–9 Years: Knowledge Opportunities for the Science of Planetary Defense, 4-6 Novembre, 2020.
- [10] Lazzarin et al. *Spectroscopic investigation of near-Earth objects at Telescopio Nazionale Galileo*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 359, p. 1575–1582, 2005.
- [11] Morbidelli et al. *Origin and Evolution of Near-Earth Objects*. University of Arizona Press, Tucson, p. 409-422, 2002.
- [12] Müller et al. *Thermal infrared observations of asteroid (99942) Apophis with Herschel*. Astronomy & Astrophysics, Volume 566, 2014.
- [13] Nesvorný et al. *The Flora Family: A Case of the Dynamically Dispersed Collisional Swarm?* Icarus, Volume 157, p. 155–172, 2002.
- [14] Pravec et al. *The tumbling spin state of (99942) Apophis*. Icarus, Volume 233, p. 48–60, 2014.
- [15] Pravec et al. *Tumbling asteroids*. Icarus, Volume 173, p. 108–131, 2005.
- [16] Reddy et al. *Chelyabinsk meteorite explains unusual spectral properties of Baptistina Asteroid Family*. Icarus, Volume 237, p. 116–130, 2014.
- [17] Reddy et al. *Surface Composition of (99942) Apophis*. The Astronomical Journal, Volume 155, 2018.

- [18] Vernazza et al. *Multiple and fast: the accretion of ordinary chondrite parent bodies*. The Astrophysical Journal, volume 791, 2014.
- [19] Vernazza et al. *The Formation and Evolution of Ordinary Chondrite Parent Bodies*. arxiv.org (arXiv:1611.08734), 2016.
- [20] Vokrouhlický et al. *The Yarkovsky and YORP Effects*. Asteroids IV, University of Arizona Press, p.509-531, 2015. ISBN: 978-0-816-53213-1.
- [21] Sansaturio; Arratia. *Apophis: the Story Behind the Scenes*. Advances in Meteoroid e Meteor Science, capitolo 4, p. 425-434, 2008.
- [22] Binzel. *The Torino Impact Hazard Scale*. Planetary e Space Science, Volume 48, p. 297-303, 2000.
- [23] Bus; Binzel. *Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy*. Icarus, Volume 158, p. 146–177, 2002.
- [24] P. Beck E. Cloutis; M. Izawa. *Reflectance Spectroscopy of Chondrites*. Primitive Meteorites e Asteroids, cap. 4, p. 273-343, 2018.
- [25] D. Vokrouhlicky; P. Farinella. *The Yarkovsky Seasonal Effect on Asteroidal Fragments: A Nonlinearized Theory for Spherical Bodies*. The Astronomical Journal, 1999.
- [26] D. Tholen; D. Farnocchia. *Detection of Yarkovsky Acceleration of (99942) Apophis*. Virtual Workshop: 7th IAA Planetary Defense Conference, 26-30 Aprile 2021.
- [27] Gaffey; Gilbert. *Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of the H-type ordinary chondrites and the IIE iron meteorites*. Meteoritics & Planetary Science, 2010.
- [28] Jean-Yves Prado; Daniel Hestroffer; Alain Herique. *APOPHIS Express, a unique opportunity for visiting asteroid Apophis in 2029*. Virtual Workshop: 7th IAA Planetary Defense Conference, 26-30 Aprile 2021.
- [29] Edward R. D. Scott. *Treatise on Geochemistry, Volume 1*. Elsevier Science, 2003. ISBN: 978-0-08-098300-4.
- [30] Tholen. *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*. PhD thesis, University of Arizona, Tucson, 1984.
- [31] K. Walsh. *Rubble Pile Asteroids*. Annual Review of Astronomy e Astrophysics, volume 56, p. 593-624, 2018.