***I compagni di Giove***

Python è un linguaggio divenuto popolare in questo ultimo decennio per l’elaborazione, analisi e presentazione di dati allo scopo di sviluppare strategie e modelli per aiutare le decisioni aziendali. Per questo, assieme ad altri tool, è diventato uno standard *de facto* in Data Science, una materia interdisciplinare che si occupa di analisi statistica per migliorare i processi decisionali.

Il linguaggio python possiede molte librerie ed è utilizzato in varie materie, come ad esempio l’astronomia. In questo articolo vedremo come estrarre semplici conoscenze (*insight*) dall’analisi dei dati orbitali degli asteroidi delle famiglie:

1. ***Troiani di Giove:*** questa famiglia di asteroidi si muove sulla stessa orbita di Giove e sono sotto classificati in:
   * Troiani situati nel punto lagrangiano L4 e precedono Giove
   * Greci: situati nel punto lagrangiano L5 e seguono Giove

Già predetti da Gauss nel 1772 come possibili punti orbitali stabili, solo nel 1906 Max Wolff scoprì il primo asteroid Troiano e lo chiamò 588 Achille, in onore dell’eroe greco Achille, eroe della Guerra di Troia. Probabilmente sono stati catturati da Giove in epoca della sua formazione.

1. ***Hilda:*** questa famiglia di asteroidi possiede un’orbita compresa fra Marte e Giove all’esterno della fascia principale. Non sono classificati come pericolosi, la loro distanza dal sole varia fra 3.42 AU e 4.53 AU. Si trovano in risonanza di moto medio 3:2 con Giove, tali da avere una certa stabilità orbitale da almeno 2 miliardi di anni. Visti dall’alto formano un triangolo vicino ai punti L3, L4 ed L5. La famiglia prende il nome dall’oggetto principale: 153 Hilda
2. ***Hungaria:*** sono una famiglia di asteroidi che orbita tra Marte e Giove entro la fascia principale. Non sono classificati come pericolosi, la loro distanza dal sole varia da 1.80 AU a 2.09 AU. Hanno un diametro di circa 8.9 Km. La famiglia prende il nome dall’oggetto principale: 434 Hungaria

Cerchiamo di arrivare alle stesse conclusion basandosi dall’elaborazione dei dati astronomici disponibili dai siti degli enti di ricerca.

I dati orbitali di queste famiglie sono liberamente disponibili e scaricabili dal sito del Minor Planet Center (MPC): dato che i file sono molto grandi, il MPC offre diversi formati a seconda dell’utilità. Il sito è il seguente: <https://cgi.minorplanetcenter.net/data>: quindi selezionare “Orbits for all asteroids in the MPC database” (*formato dat.gz*) Una volta scaricato si ottiene un file csv di 320 Mb circa. Non tutti i campi del file sono necessari per l’analisi: verrano utilizzati solo un sotto insieme. Tramite Python possiamo effettuare un’ispezione del contenuto e visualizzare le prime righe del file:

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Il Data Format Manual dell’MPC riporta il significato di ogni colonna, ecco le principali:

* H: magnitudine assoluta
* G: inclinazione
* Num\_obs: numero di osservazioni
* M: anomalia media
* U: incertezza dei parametri
* a: semiasse Maggiore
* e: eccentricità dell’orbita

Il file contiene 38 campi (colonne) e 1243630 record. Prima di proseguire con l’analisi effettuiamo una pulizia dei dati eliminando le colonne che interessano all’analisi, si rinominano alcune coloenne ed elenchiamo tutte le differenti tipi di orbite che il dataset contiene. La lista di tutte le possibili famiglie orbitali è la seguente:

1. MBA
2. Phocaea
3. q < 1.665 AU
4. Hilda
5. Amor
6. Hungaria
7. Trojan
8. Apollo
9. Distant Object
10. Aten
11. Atira

Il dataset riporta 11 tipi di orbite differenti a cui sono associate famiglie di asteroridi differenti. Filtriamo quindi solo sulle tre famiglie che ci interessano, ovvero

* Troiani
* Hungaria
* Hilda

ed eliminiamo gli *outlies (*σ > 10*)* ed i record per i quali MPC non ha assegnato dei valori (Nan o Null). A questo punto possiamo tracciare un primo grafico che, basandosi sull’anno di prima osservazione, mette in evidenza il numero di asteroidi individuati totali ad ogni anno.

A graph of a function

Description automatically generated with medium confidence

Si evince che dai dati dell’MPC:

* la popolazione degli Hungaria supera di molto le alter due famiglie: l’ultima osservazione visuale di un asteroide appartenente a tale famiglia risale alla fine degli anni ’90.

Analogalmente possiamo Vedere la distribuzione statistica di queste tre famiglie:

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Utilizzando un diagramma a scatter possiamo vedere a che distanza media dal sole orbitano gli asteroid di queste tre famiglie rispetto all’eccentricità dell’orbita e all’inclinazione dell’orbita sull’eclittica.

A screenshot of a computer screen

Description automatically generated

Alcune considerazioni sulla famiglia Hilda:

* Si trovano all’esterno della fascia principale degli asteroidi (a ≈ 4 U.A), con un’orbita variabile tra la fascia e Giove (per i dettagli si rimanda al prossimo articolo).
* Hanno l’orbita più eccentrica delle tre classi, ed è quella che fra le tre classi ha un’inclinazione sul piano del Sistema Solare minore di tutti (minore di 20°)

Alcune considerazioni sulla famiglia Hungaria:

* Si trovano all’interno della fascia principale degli asteroidi: infatti possiedono un semi asse maggiore compreso fra 1.7 U.A. e 2 U.A
* Gli Hungaria invece hanno orbite mediamente più inclinata, compresa fra 12° e 40°

Essi appartengono alla famiglia di asteroid più vicini alla Terra che si trovano attualmente in un’orbita stabile. Su lunghi periodi la loro stabilità dipende dale variazioni di eccentricità dell’orbita di Marte.

Alcune considerazioni sui Troiani:

* I Troiani sono co-orbitali all’orbita di Giove (a ≈ 5.2 A.U.). Si suddividono in due gruppi: Troiani e Greci a seconda della posizione relativa rispetto a Giove.

Tramite un istogramma possiamo analizzare la distribuzione della magnitudine assoluta degli asteroidi (Colonna H del dataset) per ogni famiglia.

A graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

* Gli Hungaria sono gli asteroidi più luminosi con H ≈ 19. In tale fascia appartengono circa 3500 asteroidi su un totale di circa 5000. Essi sono classificati come asteroidi di ***tipo E***, con un albedo elevata, seguiti dagli Hilda (H ≈16) ed infine i Troiani (H≈14,5).
* Gli Hilda essendo composti da carbonati sono meno luminosi, quindi hanno in media una magnitudine assoluta minore.
* I troiani sono asteroidi classificati di ***tipo D*** composti da silicate e carbonio con luminosità molto bassa, quindi sono quelli con magnitudine assoluta minore fra le tre famiglie.

Nonostante le considerazioni fatte in questo articolo sono già note nella letteratura scientifica, si è voluto dimostrare come, utilizzando conoscenze di base di programmazione ed i dati messi a disposizione al pubblico dagli enti ricerca, sia possible raggiungere le stesse conclusioni. Si tratta di un esempio di *citizen science*: il coinvolgimento di cittadini ad una semplice ricerca scientifica.

Successivamente verrà effettuata un’analisi più approfondita di alcuni di questi oggetti mettendo in evidenza alcune caratteristich orbitali e risonanze con altri oggetti.

***Biografia***

* [***https://minorplanetcenter.net/Extended\_Files/Extended\_MPCORB\_Data\_Format\_Manual.pdf***](https://minorplanetcenter.net/Extended_Files/Extended_MPCORB_Data_Format_Manual.pdf)

***La famiglia Hilda***

Iniziamo con l’analisi degli asteroridi della famiglia Hilda: il punto di partenza è lo stesso dataset usato per l’analisi espresso nell’articolo “I compagni di Giove”: la differenza è che adesso filtriamo il dataset per questa diversa famiglia ed eliminando ancora una volta gli outliers.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Selezioniamo un sottoinsieme della famiglia di asteroidi (120 oggetti) compreso l’asteroide Hilda, e disegnamo la la distribuzione statica delle loro orbite su un piano visto dall’alto del Sistema Solare alla situazione attuale (Agosto 2023). Ecco la proiezione degli Hilda al giorno 2023-08-07 15:01:25 sul piano del Sistema Solare.

A graph of black dots

Description automatically generated

Si nota come gli asteroidi orbitano all’interno di un triangolo equilatero i cui vertici lambiscono l’orbita del gigante gassoso; la loro inclinazione sul piano orbitale è compresa in un intervallo ± 0.5 U.A.

Analizziamo ora la dinamica dell’orbita effettuando uno snapshot dell’oribta ad intervalli prefissati. Per fare ciò viene scritto un software python che fa uso della libreria python rebound: essa fornisce le API per integrare un sistema an *N-corpi*. Anzitutto bisogna recuperare i parametri di ciascun oggetto dal database New Horizon della NASA: massa (ove possible), posizione ***p*** (x, y, z) e vettore velocità ***v*** (vx, vy, vz), quindi si integra la soluzione per un periodo di tempo prefissato.

Il tempo di integrazione scelto è di un anno gioviano: in tal modo possiamo analizzare come cambia l’orbita degli Hilda per ogni rivoluzionedi Giove. Bisogna fissare anche un quanto di tempo per l’integrazione (passo) entro il quale vengono mantenuti costante i vettori posizione e velocità. Un anno gioviano sono 11,85 anni terrestri, ovvero 4330 giorni terrestri: si è scelto di prendere 433 campioni per ogni asteroide del subset (ricordiamo sono 120), quindi in tutto bisogna ricavare:

433 campioni/oggetto x 120 oggetti = 51960 campioni

Ogni campione è composto da due vettori (***p***, ***v***) quindi in totale abbiamo:

51960 campioni \* 2 \* 3 = 311760 campioni

Ecco la posizione degli Hilda per un intero anno gioviano (11 frame). I colori rappresentano i seguenti oggetti:

* arancione: il Sole
* rosso: Giove
* blu: l’asteroide Hilda

A collage of images of dots

Description automatically generated

Seguiendo l’orbita di Hilda per un intero anno gioviano troviamo che nel tempo in cui Giove effettua una rotazione intorno al Sole, Hilda ne compie una e mezza. Ovvero ogni due rotazioni complete di Giove, Hilda ne compie tre. Quando le orbite di due corpi celesti sono in un rapporto esprimibile in un numero razionale si dice che i due oggetti sono in risonanza.

Il fenomeno si visualizza meglio nel grafico seguente ove viene riportato il modulo della distanza ││***x***││ di Hilda (assieme ad altri asteroidi) in un anno gioviano (433 campioni):

A graph of colored lines

Description automatically generated

Ad ogni periodo di Giove (in blu) corrisponde una rivoluzione e mezza di Hilda. il fenomeno è condiviso da tutti gli asteroidi della stessa famiglia (nel grafico ne vengono riportate solo quattro): l’unica differenza riguarda la fase.

In python possiamo disegnare l’orbita di alcuni degli Hilda nello spazio 3D, ove sui tre assi cartesiani indicano la distanza (A.U.), al centro in giallo c’è il Sole ed in rosso scuro l’orbita di Giove. L’orbita di Hilda è disegnata in colore blu e si nota come l’orbita sia inclinata rispetto all’eclittica (circa 7°)

A graph of a diagram

Description automatically generated with medium confidence

Proseguiamo con l’analsisi: dal repository del sito [Planetary Data System](https://sbn.psi.edu/pds/resource/neowisediam.html), sono disponibili al download dati riguardo la massa, il diametro ed albedo di alcuni oggetti del Sistema Solare della missione NEOWISE. La missione NEOWISE operative dal 2013 al 2017 ha utilizzato un telescopio nell’infrarosso per cercare e analizzare piccoli asteroidi e comete che possono minacciare la Terra. Scarichiamo il dataset, eliminiamo le colonne superflue per l’analisi e filtriamo sugli oggetti Hilda. Ecco Il contenuto:

A table with numbers and letters

Description automatically generated

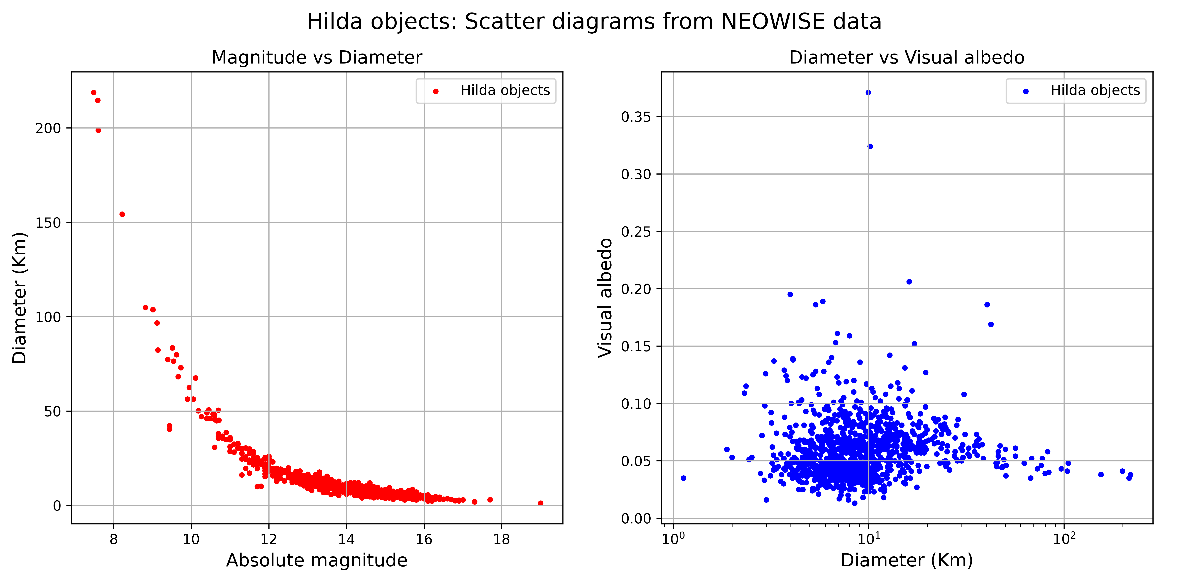
Una breve ispezione dei dati ci dice che il dataset contiene 1089 oggetti di magnitudine assoluta media 13,97 un diametro medio di 11,819 Km ed albedo media (in visuale) 0,0597.

A table of numbers and a few digits

Description automatically generated with medium confidence

Procediamo con l’analisi con due diagrammi scatter che mettono in relazione

* magitudine assoluta e diametro degli oggetti
* albedo (in banda visuale) diametro degli oggetti



Come si vede dal grafico a sinistra, gli oggetti più luminosi sono quei (pochi) che hanno diametro maggiore. All’aumentare della magnitudine cresce il numero di Hilda con diametro minore. A destra invece vediamo che l’albedo degli Hilda (circa 0,05) si concentra sugli oggetti con diametro 10 Km (in questo diagramma l’asse delle scisse è in scala logaritmica).

Per dare un’idea delle dimensioni di questa famiglia di asteroidi, utilizzando il modulo folium si può proiettare il diametro di alcuni di essi su una mappa geografica centrata sula sede del GAV: ho evidenziato

* il più piccolo (2010 HZ103) d=1,131 Km ref: https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K10/K10J47.html
* 25-percentile (2008 TY156) d= 6.149 Km
* 50-percentile (2003 WW1) d= 8.362 Km
* 75-percentile (1999 VL148) d = 11.883 Km <https://eo.wikipedia.org/wiki/(60232)_1999_VL148>
* 75-percentile (2002 GA22) d = 11.883 Km.
* il più grande (153 Hilda) d = 218.844 Km (su <https://www.spacereference.org/asteroid/153-hilda-a875-vc> ove il diametro e’ riportato un diametro piu’ piccolo del 22%)

A map with a circle in the middle

Description automatically generated

Concludiamo l’analisi degli Hilda con due istogrammi riguardo alla distribuzione del diametro (istogramma rosso a sinistra) e dell’albedo (istogramma blu a destra). Alcune considerazioni:

* La maggior parte degli asteroidi Hilda ha un diametro inferiore a 50 Km, ovvero il 99% di tutti gli asteroid ha un diemetro inferior a 153 Hilda (che e’ il piu’ grande). E’ coerente anche con il valore mediano della distribuzione (d = 8.362 Km)

A graph of a graph

Description automatically generated with medium confidence

* L’albedo si concentra sul valore compreso fra 0,04 e 0,07 docuta alla loro composizione carbonacea

Tutti I grafici sono coerenti con quanto gia’ riportato in letteratura: un indice di bonta’ dell’analisi amatoriale.

***Biografia***

* [***https://academic-accelerator.com/encyclopedia/jupiter-trojan#carouselExampleIndicators***](https://academic-accelerator.com/encyclopedia/jupiter-trojan#carouselExampleIndicators)
* [***https://minorplanetcenter.net/Extended\_Files/Extended\_MPCORB\_Data\_Format\_Manual.pdf***](https://minorplanetcenter.net/Extended_Files/Extended_MPCORB_Data_Format_Manual.pdf)
* [***https://www.spacereference.org/asteroid/153-hilda-a875-vc***](https://www.spacereference.org/asteroid/153-hilda-a875-vc)
* [***https://www.jpl.nasa.gov/missions/neowise***](https://www.jpl.nasa.gov/missions/neowise)
* [***https://sbn.psi.edu/pds/resource/neowisediam.html***](https://sbn.psi.edu/pds/resource/neowisediam.html)
* NEOWISE REACTIVATION MISSION YEAR TWO: ASTEROID DIAMETERS AND ALBEDOS C. R. Nugent, A. Mainzer, J. Bauer, R. M. Cutri, E. A. Kramer, T. Grav, J. Masiero
* WISE/NEOWISE OBSERVATIONS OF THE HILDA POPULATION: PRELIMINARY RESULTS T. Grav, A. K. Mainzer, J. Bauer, J. Masiero, T. Spahr, R. S. McMillan, R. Walker, R. Cutri, E. Wright, P. R. Eisenhardt, E. Blauvelt, E. DeBaun, D. Elsbury, T. Gautier IV, S. Gomillion, E. Hand, and A. Wilkins
* <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>

***I Greci e Troiani***

Procediamo con l’analisi degli asteroridi Greci e Troiani: il punto di partenza è lo stesso dataset usato per l’analisi espresso nell’articolo “I compagni di Giove”: la differenza è che adesso filtriamo il dataset per questa diversa famiglia ed eliminando ancora una volta gli outliers.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Selezioniamo un sottoinsieme della famiglia di asteroidi (120 oggetti) compreso l’asteroide Achille, e disegnamo la la distribuzione statica delle loro orbite su un piano visto dall’alto del Sistema Solare alla situazione attuale (Agosto 2023). Ecco la proiezione dei Troiani al giorno 2023-08-18 16:48:26 sul piano del Sistema Solare.

A screenshot of a computer screen

Description automatically generated

Gli asteroidi di questa famiglia di asteroidi sono co-orbitali all’orbita di Giove e si dividono in due sottogruppi:

* quelli che precedono Giove (chiamati Troiani)
* quelli che seguono Giove (chiamati Greci)

La loro inclinazione sul piano orbitale è compresa in un intervallo ± 1 U.A.

Analizziamo ora la dinamica dell’orbita effettuando uno snapshot dell’oribta ad intervalli prefissati. Come per l’analisi precedente sulla famiglia Hilda viene scritto un software python che fa uso della libreria python rebound: per analizzare un sistema an *N-corpi*. Si recuperano i parametri di ciascun oggetto dal database New Horizon della NASA: massa (ove possible), posizione ***p*** (x, y, z) e vettore velocità ***v*** (vx, vy, vz), quindi si integra la soluzione per un periodo di tempo prefissato.

Il tempo di integrazione scelto è di un anno gioviano: in tal modo possiamo analizzare come cambia l’orbita degli Troiani per ogni rivoluzionedi Giove. L’analisi finale contiene sempre 311760 campioni.

Ecco la posizione dei Troiani per un intero anno gioviano (11 frame). I colori rappresentano i seguenti oggetti:

* arancione: il Sole
* rosso: Giove
* blu: l’asteroide Achilles

A screenshot of a grid

Description automatically generated

Seguiendo l’orbita di Achilles per un intero anno gioviano troviamo che:

* L’asteroide e’ in rotazione sincrona con Giove.
* L’asteroide precede sempre Giove. Si trova nel punto lagrangiano L4 e forma un angolo di 60° con il Sole e il Gigante Gassoso.

I due oggetti sono in risonanza di moto medio 1:1. Lo stesso comportamento vale anche per gli altri asteroidi Troiani in compagnia di Achilles. Il sottogruppo dei Greci sono anch’essi in rotazione sincrona di moto medio 1:1 con Giove. Si trovano inteorno al punto lagrangiano L5 e seguono sempre Giove.

Il fenomeno si visualizza meglio nel grafico seguente ove viene riportato il modulo della distanza ││***x***││ di Achilles (assieme ad altri asteroidi) in un anno gioviano (433 campioni):

A graph showing different colored lines

Description automatically generated

Ad ogni periodo di Giove (in blu) corrisponde una rivoluzione di Achilles. il fenomeno è condiviso da tutti gli asteroidi della stessa famiglia (nel grafico ne vengono riportate solo quattro): l’unica differenza riguarda la fase. Notare la differenza con lo stesso grafico riportato nell’analisi della famiglia Hilda: mentre in questo caso le distanza medie sono le circa stesse per tutti I corpi celesti, ovvero 5,2 A.U. (non c’è una componente continua addizionale), gli Hilda invece orbitano piu’ vicini al Sole (distanza media 4.2 A.U.)

In python possiamo disegnare l’orbita di alcuni troiani nello spazio 3D, ove sui tre assi cartesiani indicano la distanza (A.U.), al centro in giallo c’è il Sole, in rosso scuro l’orbita di Giove e con colori differenti le orbite degli asteroidi.

Rispetto alla semplice proiezione 2D dei diagrammi precedenti, il disegno in 3D consente di analizzare meglio la raffigurazione dell’orbita nello spazio. Alcuni asteroidi possiedono un’orbita molto inclinata, ad esempio:

* l’orbita di Stentor (https://it.wikipedia.org/wiki/2146\_Stentor) del sottogruppo dei Greci possie un’orbita inclinata di 39°sull’eclittica
* l’orbita di Menestheus (<https://it.wikipedia.org/wiki/4068_Menestheus>) del sottogruppo dei Greci possie un’orbita inclinata di 17° sull’eclittica
* l’orbita di Iphidamas (https://it.wikipedia.org/wiki/4791\_Iphidamas) del sottogruppo dei Troiani possie un’orbita inclinata di 25° sull’eclittica

Si ipotizza che l’alta inclinazione orbitale sia dovuto al moto di Saturno che ne perturba le orbite.

A collage of graphs

Description automatically generated

Proseguiamo con l’analsisi sfruttando i dati pubblicamente disponibili dal repository del sito [Planetary Data System](https://sbn.psi.edu/pds/resource/neowisediam.html) forniti dalla missione NEOWISE. Scarichiamo il dataset, eliminiamo le colonne superflue per l’analisi e filtriamo sugli oggetti Troiani. Ecco il contenuto:

A table with numbers and letters

Description automatically generated

Una breve ispezione dei dati ci dice che il dataset contiene 1860 oggetti di magnitudine assoluta media 12,25 un diametro medio di 20,83 Km ed albedo media (in visuale) 0,07.

A table with numbers and a few black text

Description automatically generated

Procediamo con l’analisi con due diagrammi scatter che mettono in relazione:

* magitudine assoluta e diametro degli oggetti
* albedo (in banda visuale) diametro degli oggetti

A graph of a red and blue line

Description automatically generated with medium confidence

Come per gli Hilda, all’aumentare della magnitudine (minore luminosita’) aumenta il numero di oggetti con diametro minore. A destra invece vediamo che l’albedo dei Troiani (circa 0,075) si concentra sugli oggetti con diametro 20 Km (in questo diagramma l’asse delle scisse è in scala logaritmica).

Per dare un’idea delle dimensioni di questa famiglia di asteroidi, utilizzando il modulo folium si può proiettare il diametro di alcuni di essi su una mappa geografica centrata sula sede del GAV.

* il più piccolo (K09X21Y) d = 3,943 Km
* 25-percentile (C2862) d = 12,516 Km
* 50-percentile (Z3218) d = 15,558 Km
* 75-percentile (B9528) d = 22,097 Km
* il più grande (00624) d = 147,369 Km

I nomi si riferiscono alla nomenclatura dell’MPC.

A map with a circle in the center

Description automatically generated

Concludiamo l’analisi dei Troiani con due istogrammi riguardo alla distribuzione del diametro (istogramma rosso a sinistra) e dell’albedo (istogramma blu a destra). Alcune considerazioni:

* La maggior parte degli asteroidi Troaini ha un diametro di 20,83 km. Sono mediamenti piu’ grandi degli Hilda.
* Si nota anche una maggiore variabilita’ nella distribuzione del diametro rispetto agli Hilda: l’istogramma e’ piu’ “largo”.

A graph of a bar graph

Description automatically generated with medium confidence

* L’albedo si concentra sul valore compreso fra 0,05 e 0,075 (riflettono di piu’ la luce solare degli Hilda) con un numero di campioni maggiore rispetto agli Hilda.

Tutti I grafici sono coerenti con quanto gia’ riportato in letteratura: un indice di bonta’ dell’analisi amatoriale.

* <https://inspirehep.net/literature/930574>
* <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103509002462>
* <https://drtgrav.com/2014/08/05/diameters-and-albedos-of-the-hilda-population/>
* <https://www.researchgate.net/figure/Distribution-of-Hilda-asteroids-in-cartesian-coordinates-X-Y-left-panel-X-Z-right_fig1_267765953>