

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di Laurea in
Ingegneria Aerospaziale
Classe L-9

Elaborato finale di laurea

in

Fondamenti di Meccanica Orbitale

**Analisi e Implementazione del Catalogo
Stellare della Missione GAIA**

Presentato da:

Federica Remor

Relatore:

Prof. Paolo Tortora

Correlatore:

Dott. Marco Zannoni

Anno Accademico 2017/2018

Alla mia famiglia

Ricerca è ciò che faccio quando non so che cosa sto facendo.

Wernher von Braun

Indice

Elenco delle figure	III
Introduzione	1
1 GAIA	3
1.1 Missione GAIA	3
1.2 Data Release 1 e 2	4
1.3 Gaia Spacecraft	6
1.4 Passbands	7
1.5 Sistema di Riferimento	8
1.6 Known Issues	9
1.6.1 Astrometria: soluzioni a 2 parametri vs soluzioni a 5 parametri	9
1.6.2 Considerazioni per l'uso dell'astrometria di DR2 . . .	10
1.6.3 Cross-Match: Hipparcos 2	10
1.6.4 Velocità Radiali: potenziale contaminazione nelle re- gioni affollate	10
2 Archivio di Gaia	13
2.1 Introduzione	13
2.2 Metodi di Ricerca	14
2.3 Parametri Principali	16
3 Utilizzo di Python	21
3.1 Implementazione del Codice	21
3.2 Implementazione di Grafici	26
3.2.1 Codice implementato	26

3.2.2	Grafici ascensione retta e declinazione	27
3.2.3	Grafici moto proprio	32
3.2.4	Grafici parallasse	35
4	Implementazione Sottoinsiemi di maggiori dimensioni	39
4.1	Sottoinsieme con 10 000 corpi	39
4.1.1	Grafici ascensione retta e declinazione	40
4.1.2	Grafici moto proprio	44
4.1.3	Grafici parallasse	50
4.1.4	Grafici magnitudine G	51
4.2	Sottoinsieme con 50 000 corpi	52
4.2.1	Grafici ascensione retta e declinazione	53
4.2.2	Grafici moto proprio	56
4.2.3	Grafici parallasse	62
4.2.4	Grafici magnitudine G	64
	Conclusioni e sviluppi futuri	65
	Bibliografia	67
	Ringraziamenti	69

Elenco delle figure

1.1	Bande Passanti G, G_{BP} e G_{RP} (G: verde, G_{BP} : blu, G_{RP} : rosso).	8
2.1	Metodo di ricerca 'Basic', Gaia Archive.	14
2.2	Metodo di ricerca 'ADQL', Gaia Archive.	15
3.1	Tabella di output di un esempio di <i>query</i> ADQL.	25
3.2	Tabella di output di un esempio di <i>query</i> ADQL.	25
3.3	Istogramma dell'ascensione retta.	28
3.4	Istogramma della declinazione.	29
3.5	Grafico scatter, relazione tra ascensione retta e declinazione.	30
3.6	Istogramma degli errori dell'ascensione retta.	31
3.7	Istogramma degli errori della declinazione.	32
3.8	Grafico Scatter, pmra e pmdec.	33
3.9	Istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.	34
3.10	Istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione della declinazione.	35
3.11	Istogramma relativo alla parallasse	36
3.12	Istogramma relativo agli errori della parallasse	37
4.1	Relazione tra Ascensione retta e declinazione di 10 000 corpi.	41
4.2	Istogramma sugli errori dell'ascensione retta.	43
4.3	Istogramma sugli errori della declinazione.	43
4.4	Relazione tra il moto proprio di due diversi sottoinsiemi.	45
4.5	Relazione tra gli errori del moto proprio con regressione lineare.	46
4.6	Moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.	48

4.7	Moto proprio nella direzione della declinazione.	48
4.8	Istogramma degli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.	49
4.9	Istogramma degli errori del moto proprio nella direzione della declinazione.	49
4.10	Istogramma relativo alla parallasse.	50
4.11	Istogramma relativo agli errori della parallasse.	51
4.12	Istogramma relativo alla magnitudine G.	52
4.13	Grafico Scatter di ascensione retta e declinazione che relaziona i due sottoinsiemi.	54
4.14	Grafico Scatter degli errori di ascensione retta e declinazione che relaziona i due sottoinsiemi.	55
4.15	Grafico Scatter del moto proprio che relaziona i due sottoinsiemi.	57
4.16	Grafico Scatter degli errori moto proprio che relaziona i due sottoinsiemi.	58
4.17	Istogramma del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione dell'ascensione retta.	60
4.18	Istogramma del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione della declinazione.	60
4.19	Istogramma degli errori moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione dell'ascensione retta.	61
4.20	Istogramma degli errori del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione della declinazione.	61
4.21	Istogramma della parallasse che relaziona i due sottoinsiemi.	63
4.22	Istogramma degli errori di parallasse che relaziona i due sottoinsiemi.	63
4.23	Istogramma della magnitudine G che relaziona i due sottoinsiemi.	64

Abstract

La missione spaziale Gaia è una missione voluta dall'*ESA* (*European Space Agency*) per studiare ed analizzare i corpi presenti nella nostra galassia, la Via Lattea, e non solo.

Segue le orme della precedente missione Hipparcos, analizzando diversi parametri fondamentali per lo studio dei corpi celesti e ponendosi come obiettivo quello di realizzare un catalogo formato da più di un miliardo di stelle.

Lo studio della missione, delle *release* pubblicate e più in particolare dei corpi catalogati in Gaia sono un ottimo punto di partenza per procedere con una ricerca più approfondita all'interno del catalogo stesso.

Inoltre, si rivolge particolare attenzione ai parametri fondamentali che caratterizzano un corpo celeste.

La ricerca viene effettuata tramite l'implementazione di un codice all'interno di un dato linguaggio di programmazione.

Questo risulta molto utile poiché permette di addentrarsi in modo diretto nei dati e nei risultati ottenuti da Gaia in questi anni di esplorazione.

Il codice implementato, inoltre, consente la realizzazione di una serie di grafici volti allo studio e all'analisi più approfondita dei dati catalogati in Gaia, e permette inoltre il confronto tra diversi sottoinsiemi di corpi celesti.

Introduzione

L'elaborato finale di laurea qui presente ha come obiettivo l'analisi e lo studio del catalogo stellare della missione GAIA, e in aggiunta l'implementazione di un codice per l'analisi stessa.

Il lavoro qui esposto vede la sua nascita nel tirocinio curricolare, svolto al Tecnopolo di Forlì ¹, in cui si è svolta un'analisi preliminare del Catalogo Stellare GAIA (in particolare della seconda *release*), e si è studiato il linguaggio di programmazione Python.

Lo studio è stato suddiviso in una prima fase volta alla conoscenza della parte più bibliografica di Gaia, degli obiettivi raggiunti dalla missione e dei cataloghi rilasciati.

Inoltre è stata studiata la struttura dello *spacecraft* e si è venuto a conoscenza di alcune problematiche verificate attualmente all'interno della missione. Successivamente è stato analizzato l'archivio web di Gaia, la modalità di ricerca dei corpi all'interno dello stesso archivio e i parametri principali che vengono analizzati.

È seguita poi una seconda fase di implementazione, nella quale sono stati realizzati diversi codici sul linguaggio di programmazione Python, e, da questo, è stata realizzata e analizzata una serie di grafici.

¹Il Tecnopolo di Forlì, in via Baldassarre Carnaccini, 12, in cui ha sede il polo tecnologico aeronautico, è un importante centro di ricerca e sviluppo in ambito aeronautico, aerospaziale, energetico e meccanico.

Capitolo 1

GAIA

In questo capitolo, viene introdotta Gaia. Si vanno a delineare le generalità e gli obiettivi principali che Gaia si prefissa, presentando le *release* pubblicate da Gaia, esponendo i vari dati raccolti. Vengono descritti i moduli principali di cui è costituito il satellite e infine vengono presentate alcune problematiche a cui sono sottoposte le *release*.

1.1 Missione GAIA

La missione GAIA è una missione spaziale sviluppata dall'ESA (*European Space Agency*), avente il compito di creare la più grande e precisa mappa tridimensionale della nostra galassia, la Via Lattea, andando ad individuare differenti parametri che caratterizzano i corpi celesti.

Gaia, però, non è la prima ad assoggettarsi questo compito, poiché altre missioni prima di lei hanno catalogato moltitudini di corpi celesti.

Infatti, nel 1989, sempre a carico dell'ESA, nacque la missione *Hipparcos* (High Precision PARallax COLlectin Satellite), prima missione volta a trovare la posizione delle stelle.

Questa fu la prima missione spaziale rivolta verso il campo dell'astrometria, campo astronomico che si occupa delle misurazioni, delle posizioni, dei movimenti e delle distanze delle stelle e non solo.

Hipparcos si occupava del calcolo delle parallassi, fenomeno per cui si ha uno spostamento apparente di un corpo se si modifica il punto di osservazione. La parallasse sta anche ad indicare il valore dell'angolo di spostamento.

Partendo poi dalla parallasse, si riusciva a calcolare la distanza di una stella e il relativo moto proprio. Con il termine *moto proprio* di una stella si intende il moto apparente di una stella causato dall'effettivo movimento della stella rispetto al centro di massa del sistema solare.

Hipparcos realizzò un primo catalogo di circa 118 000 stelle, e un secondo catalogo, *Tycho*, costituito da più di 2 milioni di stelle. Entrambi hanno un'importanza fondamentale e furono utilizzati per creare il *Millennium Star Atlas*, un atlante che va a coprire tutto il cielo e che racchiude un milione di stelle fino alla magnitudine 11.

Gaia succede proprio ad Hipparcos, e cerca di migliorare i risultati ottenuti. Infatti, sia dal punto di vista della precisione, che dal punto di vista della quantità di corpi individuati, si ha un netto miglioramento delle misurazioni che Gaia riesce ad effettuare.

Gaia, infatti, riesce ad avere un'accuratezza di 200 volte maggiore rispetto ad Hipparcos, in relazione al calcolo della posizione delle stelle. Inoltre, si possono ottenere, nello stesso momento, immagini di diversi corpi celesti, mentre Hipparcos riusciva a ottenere informazioni riguardanti un singolo corpo alla volta.

Gaia è progettata per osservare ogni corpo celeste individuato e catalogato, circa 70 volte. È una misura di precisione e accuratezza mai vista precedentemente.

Inoltre, Gaia non si occupa di individuare caratteristiche riguardanti esclusivamente le stelle, ma tratta anche di comete, asteroidi, pianeti extrasolari ed altri innumerevoli corpi.

Tutto il lavoro raccolto va poi ad essere utile per studiare la composizione, la formazione e l'evoluzione della Via Lattea.

1.2 Data Release 1 e 2

Il satellite Gaia è stato lanciato il 19 dicembre 2013 ed ha iniziato ad osservare circa un miliardo di stelle presenti nella nostra galassia.

Una prima *release* è stata pubblicata il 14 settembre 2016. Al suo interno si trovano diversi dati e caratteristiche raccolti da Gaia nel periodo tra il 25 luglio 2014 e il 16 settembre 2015 (14 mesi di osservazione):

- Posizioni (α , δ) e magnitudini Gaia 'G' per 1.1 miliardi di corpi;
- Risultati astrometrici tra cui: posizioni, parallassi e moti propri per più di 2 milioni di stelle;
- Curve di luce per circa 3000 stelle;
- Posizioni (α , δ) e magnitudini G per più di 2000 quasars.

Questa prima *release* però ha anche dei punti deboli al suo interno, che nella seconda *release* si è cercato di marginare.

La seconda *release* si basa sui dati raccolti tra il 25 luglio 2014 e il 23 maggio 2016 (22 mesi di osservazione) ed è stata rilasciata il 25 Aprile 2018.

Al suo interno si trova un maggior numero di dati, rispetto alla prima *release*, e di parametri definiti. Questa seconda *release* raccoglie:

- Risultati astrometrici definiti da 5 parametri, posizioni nel cielo (α , δ), parallassi e moti propri per più di 1.3 miliardi di corpi, avendo una magnitudine limite $G = 21$.
- Velocità radiali per più di 7.2 milioni di stelle con una magnitudine media G con valore compreso tra $G = 4$ e $G = 13$ e una temperatura effettiva (T_{eff}) compresa tra $T_{eff} = 3550$ K e $T_{eff} = 6900$ K;
- Risultati astrometrici definiti da 2 parametri, posizioni nel cielo (α , δ) e magnitudine G, per più di 361 milioni di corpi;
- Magnitudini G per più di 1.69 corpi;
- Magnitudini G_{BP} e G_{RP} per più di 1.38 miliardi di corpi;
- Definizioni delle bande passanti G, BP e RP;
- Temperatura effettiva T_{eff} per più di 161 milioni di corpi, di questi 161 milioni, è presente un sottoinsieme di 87 milioni definito anche dal parametro relativo all'estinzione e, un altro sottoinsieme di 76 milioni è definito anche dal *reddening*.

Gaia è stato lanciato nel 2013, e il satellite è stato programmato per porsi in un'orbita di *Lissajous*¹ attorno al secondo punto lagrangiano del sistema Sole - Terra, cioè L_2 .

Il punto L_2 garantisce al satellite un ambiente termico e gravitazionale molto stabile e la particolare orbita va ad evitare che la Terra si ponga come ostacolo tra il satellite e il Sole. Questo, infatti, potrebbe ridurre la produzione di energia solare che il satellite riesce a produrre grazie ai suoi pannelli solari, e potrebbe andare a turbare la stabilità termica.

Inizialmente la missione doveva avere una durata di 5 anni, poi è stato deciso di posticipare il suo termine al 2022. Grazie a ciò, si riuscirà ad ottenere una terza *release* che verrà divisa in due parti, la prima verrà pubblicata nel 2020 e la seconda nel 2021.

Tutto il lavoro qui svolto va ad incentrarsi soprattutto sulla seconda *release*, DR2.

1.3 Gaia Spacecraft

Sono 3 i moduli principali che vanno a costituire il satellite Gaia:

- Payload: contiene gli strumenti ottici ed elettronici necessari per monitorare le sue azioni e per elaborare i dati. Anch'esso è formato da 3 strumenti principali:
 - Astro: strumento di *astrometria* che, tramite la misurazione della posizione angolare delle stelle, aventi valore di magnitudine posta nell'intervallo compreso tra 5.7 mag e 20 mag, determina la loro posizione. E, da questi dati, si riesce a calcolare la parallasse, il moto proprio e la velocità delle stelle proiettate su un piano di cielo;
 - BP/RP: strumento di *fotometria* che va ad acquisire la misura di luminosità delle stelle, aventi sempre magnitudine posta nell'intervallo compreso tra 5.7 mag e 20 mag, nella banda spettrale che

¹L'orbita di Lissajous è un'orbita tridimensionale che, in prossimità dei punti di Lagrange L_1 , L_2 o L_3 di altri due corpi, è percorribile da un terzo corpo.

va da 320 nm a 1000 nm. Questo strumento riesce poi a stabilire temperatura, massa, età e composizione chimica delle varie stelle;

– RVS: spettrometro che va a misurare la velocità radiale dei corpi celesti aventi magnitudine massima pari a 17 mag.

- Mechanical Service Module: costituito di tutte le parti meccaniche, termiche e strutturali che supportano gli strumenti e gli apparecchi elettronici del satellite;
- Electrical Service Module: funge da supporto per il *payload* di Gaia e per il controllo della potenza e distribuzione elettrica del satellite, della gestione dei dati e delle comunicazioni radio con la Terra.

Inoltre, sul satellite non sono presenti parti in movimento per mantenere la messa a fuoco su stelle lontane anni luce.

I sottosistemi del satellite sono montati su una struttura rigida di carburo di silicio, la quale garantisce una struttura stabile, che non viene sottoposta ad espansioni o contrazioni causate dal calore.

1.4 Passbands

Si definisce 'banda passante' un intervallo di frequenze alle quali può lavorare un dato filtro o un dispositivo elettronico. È fondamentale definire le tre bande passanti G , G_{BP} e G_{RP} . Questo compito viene svolto dalla fotometria², che va ad assumere un ruolo molto importante per la creazione del catalogo di Gaia.

In questo caso, grazie alle bande passanti, si può ottenere il valore della magnitudine corrispondente di un corpo celeste, in una certa banda, a seguito del lavoro compiuto da uno specifico strumento.

Le bande passanti che costituiscono il sistema fotometrico di Gaia si possono definire come:

²Tecnica astronomica avente come obiettivo la misurazione dell'intensità della radiazione elettromagnetica di un corpo astronomico. Tende a misurare ampie bande di lunghezze d'onda.

- G: banda che definisce un *range* di lunghezze d'onda che parte da $\lambda = 350$ nm e finisce in $\lambda = 1000$ nm;
- G_{BP} : banda che definisce un *range* di lunghezze d'onda che parte da $\lambda = 330$ nm e finisce in $\lambda = 680$ nm;
- G_{RP} : banda che definisce un *range* di lunghezze d'onda che parte da $\lambda = 640$ nm e finisce in $\lambda = 1000$ nm.

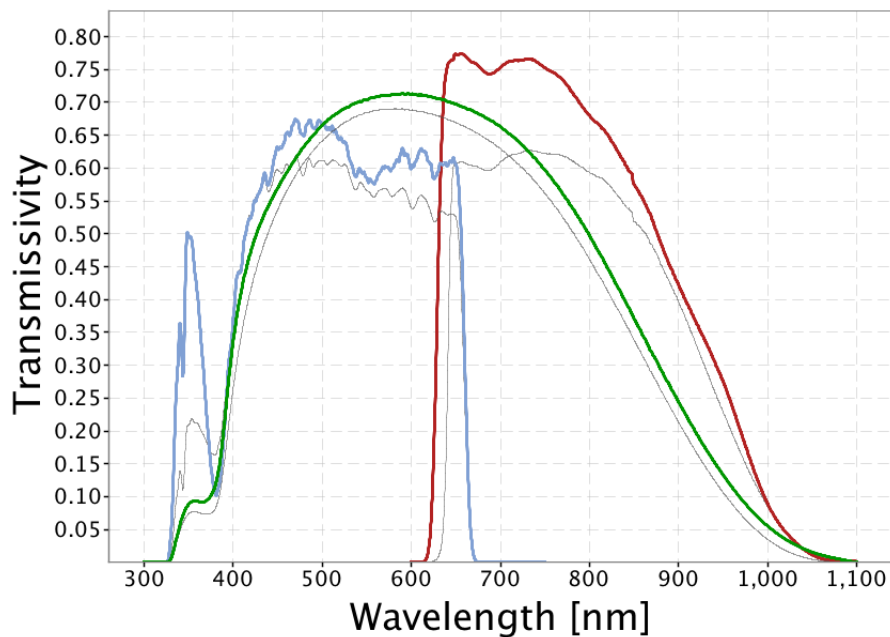


Figura 1.1: Bande Passanti G, G_{BP} e G_{RP} (G: verde, G_{BP} : blu, G_{RP} : rosso).

1.5 Sistema di Riferimento

Il sistema di riferimento è un elemento molto importante da specificare quando si vanno a studiare i corpi celesti. Come già detto, il satellite Gaia è vincolato in un'orbita, ma i corpi che analizza sono determinati da molti parametri che vanno definiti seguendo un particolare sistema di riferimento. Il sistema di riferimento su cui si basano la maggior parte dei parametri esposti nel catalogo di Gaia è l'*ICRS*, l'*International Celestial Reference System*. Questo sistema ha come origine il baricentro del Sistema Solare, e i suoi assi

sono fissi nello spazio e definiti grazie alla posizione di corpi extragalattici (soprattutto *quasars*).

Gaia fra i tanti obiettivi che si propone di realizzare vede anche quello di creare un *reference frame* non rotante, basandosi sui corpi celesti che analizza, anch'essi non rotanti, e che si riesca a conciliare con l'ICRS, cioè che abbia l'orientazione degli assi coincidente con quella dell'ICRS.

Si ottiene, quindi, il *Gaia Celestial Reference Frame, Gaia-CRF2*, che si basa sull'osservazione di 492.007 *quasars*, ottenute eseguendo diversi *cross-match* tra il catalogo di Gaia e altre due liste di *quasars* conosciute.

1.6 Known Issues

Come già accennato, ogni *release* si ritrova con qualche problema da affrontare. Qui si vedono delineate le problematiche relative alla Data Release 2 di Gaia. Alcune questioni sono tuttora irrisolte:

1.6.1 Astrometria: soluzioni a 2 parametri vs soluzioni a 5 parametri

La Data Release 2 di Gaia fornisce dati astrometrici per 1.69 miliardi di corpi, dei quali, 1.33 miliardi sono definiti da 5 parametri (ascensione retta, declinazione, moto proprio e parallasse), mentre i restanti 361 milioni sono definiti da 2 parametri (ascensione retta e declinazione).

La motivazione nell'avere corpi definiti con 2 o con 5 parametri la si trova in un sistema fotometrico preliminare usato inizialmente nella DR2 di Gaia. Infatti, per le prime analisi dei dati della seconda *release* di Gaia, venne utilizzato un sistema fotometrico che si basava sulla qualità dei dati astrometrici e fotometrici ottenuti, cioè attribuiva 5 parametri ad alcuni corpi, piuttosto che attribuirne 2, in base alla qualità dei dati che aveva a disposizione.

Nelle ultime fasi di analisi il sistema fotometrico venne aggiornato, ma non venne realizzata una nuova classificazione dei corpi secondo 2 o 5 parametri. Si ha quindi, un numero pari a 9 milioni di corpi che non venne ridefinito.

1.6.2 Considerazioni per l'uso dell'astrometria di DR2

Quando si analizza l'astrometria della Data Release 2 di Gaia bisogna tenere conto anche di diversi errori presenti al suo interno.

Si hanno infatti errori random e sistematici, come ad esempio un'incertezza formale nella parallasse, dovuta a diverse variabili come posizione, colore, magnitudine.

Si trova anche, che, alcuni dati sulla parallasse non sono affidabili, probabilmente a causa di errori di *cross-match* (questi errori si verificano soprattutto in presenza di corpi deboli).

1.6.3 Cross-Match: Hipparcos 2

Quando è stato effettuato il *cross-match* tra Gaia e il catalogo Hipparcos2, seguendo un determinato algoritmo, è risultato che solo i 2/3 dei corpi presenti in Hipparcos2 trovano il loro equivalente in Gaia (compatibilmente con gli errori di posizione).

Analizzare due o più cataloghi attraverso un *cross-match* serve per dare più informazioni agli utenti sulle caratteristiche di ogni catalogo studiato, come ad esempio la distribuzione della magnitudine, della distanza angolare, della densità superficiale dei corpi.

Questo significa che, seguendo questo algoritmo predefinito, solo i 2/3 di Hipparcos2 hanno un omologo in Gaia, compatibile con eventuali errori di posizione.

Mentre, ciò che ci si aspettava, era che quasi tutti i corpi di Hipparcos2 avessero un loro omologo in Gaia.

1.6.4 Velocità Radiali: potenziale contaminazione nelle regioni affollate

Venne eseguita la spettroscopia di un corpo (Gaia DR2 5932173855446728064) presente nel catalogo di Gaia DR2, e si trovò che il valore della velocità radiale media era molto differente da quello catalogato nella stessa *release*.

Si osservò che lo spettro di questo corpo era sovrastato dalla luce di una stella più luminosa posta più distante, ed è questo che va a incidere sulla

differenza della velocità radiale.

Questi errori si possono verificare soprattutto in regioni di stelle molto affollate. Quindi, momentaneamente, sono state rimosse quelle stelle che sono potenzialmente contaminate, e che potrebbero quindi avere il valore della velocità radiale catalogato molto differente da quello reale.

Capitolo 2

Archivio di Gaia

2.1 Introduzione

Gaia dispone di un archivio web dal quale si possono ottenere informazioni di diversi tipi.

Da questo archivio si possono effettuare ricerche all'interno dei cataloghi di Gaia, si può usufruire dei documenti, leggere resoconti riguardanti incontri e discussioni relativi alle ricerche di Gaia.

Sono presenti statistiche riguardanti entrambe le *release*, sotto forma di grafici sulla densità dei corpi celesti e istogrammi relativi ai parametri trattati nei cataloghi.

Inoltre, si ha una sezione in cui si possono creare e visualizzare grafici di ogni tipo, tra i quali si trovano istogrammi, grafici 2D, grafici di tipo '*scatter*' 3D, e si possono anche creare animazioni.

Si trova anche una sezione '*Help*' dove sono presenti istruzioni su come utilizzare al meglio l'archivio, tutorial ed esempi di ricerche su ogni tipo di catalogo.

Infine è presente anche una sezione di ricerca nella quale si possono creare ricerche personalizzate di ogni tipo, per visualizzare dati e risultati riguardanti le caratteristiche dei corpi celesti.

2.2 Metodi di Ricerca

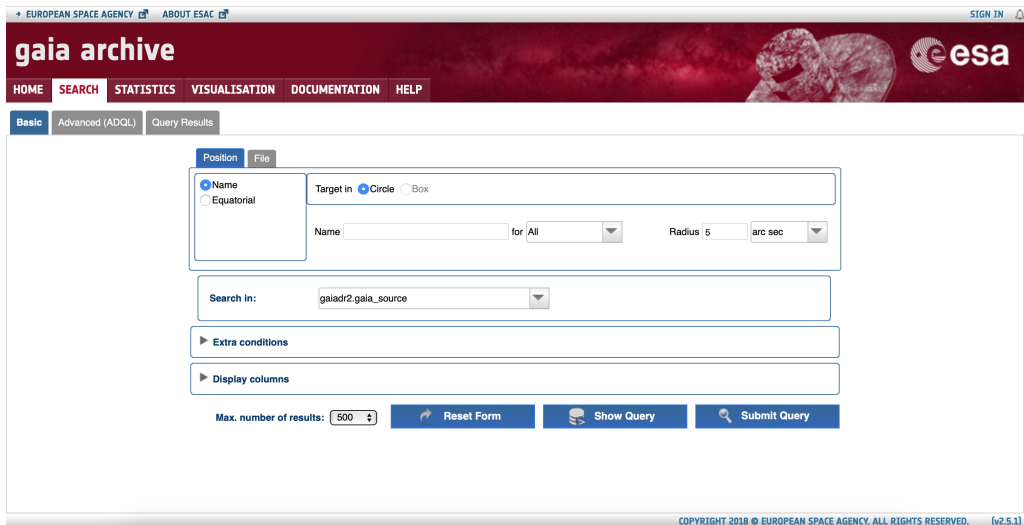
Sono due i metodi di ricerca principali presenti sull'archivio di Gaia.

Un primo metodo è il metodo 'Basic'. Qui si effettua la ricerca dei corpi semplicemente andando ad inserire il nome del corpo desiderato.

La ricerca può essere estesa ad ognuno dei cataloghi disponibili e il raggio di ricerca può essere aumentato o diminuito a proprio piacimento. Inoltre si possono selezionare i parametri che si desidera analizzare.

In alternativa, la ricerca può essere effettuata inserendo un *range* di valori di ascensione retta (RA) e declinazione (DEC), oppure inserendo un file con una lista di nomi da voler analizzare.

In uscita si ottiene una tabella dove sono presenti i risultati della ricerca compiuta, cioè i vari corpi celesti, con tutti i valori dei parametri che si è deciso di analizzare.



The screenshot shows the Gaia Archive search interface. At the top, there is a navigation bar with 'HOME', 'SEARCH', 'STATISTICS', 'VISUALISATION', 'DOCUMENTATION', and 'HELP'. Below this, there are tabs for 'Basic', 'Advanced (ADQL)', and 'Query Results'. The 'Basic' search form includes a 'Position' dropdown set to 'Equatorial', a 'Target in' dropdown set to 'Circle', and a 'Name' input field. There is also a 'Search in:' dropdown set to 'gaiadr2.gaiadr2_source'. At the bottom of the form, there are buttons for 'Reset Form', 'Show Query', and 'Submit Query', along with a 'Max. number of results:' dropdown set to '500'. The footer of the page contains the text 'COPYRIGHT 2018 © EUROPEAN SPACE AGENCY. ALL RIGHTS RESERVED. (v2.5.1)'.

Figura 2.1: Metodo di ricerca 'Basic', Gaia Archive.

Il secondo metodo di ricerca, probabilmente il più importante per il lavoro che si andrà a compiere è il metodo ADQL.

ADQL sta per *Astronomical Data Query Language* ed è basato sul SQL, *Structured Query Language*, linguaggio utilizzato per ottenere informazioni da tabelle, archiviate in un *database*. In particolare, il linguaggio ADQL si è sviluppato nel tempo, con l'aumento dei dati astronomici.

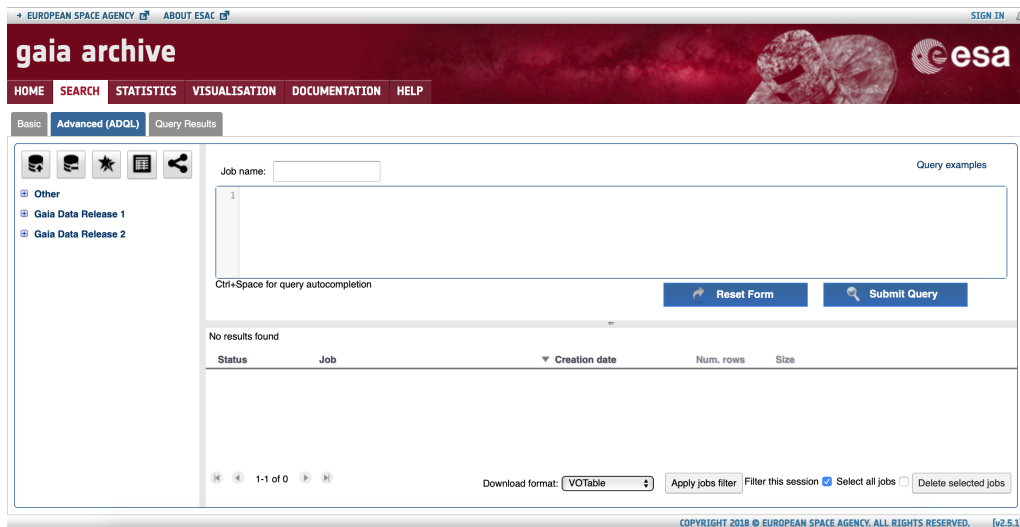


Figura 2.2: Metodo di ricerca 'ADQL', Gaia Archive.

Grazie a questo metodo, le ricerche possono essere molto specifiche, dettagliate e personalizzate dall'utente. In più, possono essere estese ad un numero maggiore di corpi, rispetto a quanto si otteneva seguendo il metodo 'Basic'.

Le ricerche si eseguono grazie a una *query*, cioè una domanda, che viene formulata dall'utente e impostata sull'archivio.

Anche in questo metodo le ricerche possono essere estese al catalogo desiderato e possono essere modificate in ogni modo secondo le proprie esigenze. Difatti, la *query* viene formulata scegliendo quanti corpi si vogliono ottenere come risultati, scegliendo i parametri che si desidera analizzare, e scegliendo come andare a selezionare i vari corpi. Questi possono essere scelti all'interno di una particolare zona, oppure semplicemente seguendo le impostazioni definite dall'utente.

Un esempio di *query* basilare che si può implementare nel database può essere:

```
SELECT TOP 100 ra, dec
FROM gaiadr2.gaia_source
WHERE ra > 35 AND ra < 40
```

In questa *query*, con i termini 'SELECT TOP' si vanno a limitare i valori che si desiderano ottenere, e che quindi corrispondono al numero di righe che si avranno nella tabella in uscita. In questo specifico esempio si chiedono in uscita 100 righe, corrispondenti a 100 corpi presenti nel catalogo.

Il catalogo in questione, come specificato nella seconda linea del codice, è il catalogo DR2 di Gaia.

Come ultima condizione, si richiede che i corpi abbiano un'ascensione retta compresa nel *range* di valori tra $ra = 35 \text{ deg}$ e $ra = 40 \text{ deg}$.

In aggiunta, si può scegliere di impostare un ordine di visualizzazione delle colonne. Se ad esempio si inserisce la linea di codice:

```
ORDER BY ra DESC
```

attraverso la funzione 'ORDER BY' si sceglie il parametro che si vuole visualizzare per primo (con eventuali altri parametri scritti di seguito), il quale sarà la prima colonna nella tabella che si ottiene in uscita. In questo caso quindi si visualizzerà per prima la colonna dell'ascensione retta (*ra*).

Con il comando 'DESC' invece si sceglie di visualizzare i risultati del primo parametro che si vuole mostrare, quindi sempre 'ra', in ordine decrescente. Se DESC non viene inserito, si ha come comando di *default* 'ASC' che invece mostra i risultati in ordine crescente.

2.3 Parametri Principali

Quando vengono effettuate le ricerche all'interno dell'archivio di Gaia, in output si ottiene una tabella dove le colonne sono composte dai parametri che l'utente ha richiesto di analizzare.

Qui sotto vediamo riportati i principali parametri su cui si andrà a lavorare:

- SOURCE.ID: *Unique Source Identifier*

Un numero unico che funge da identificatore del corpo celeste, codificato da una posizione approssimata del corpo, dalla provenienza e da altre cifre in successione.

Questo numero però non è unico fra le varie *release*, cioè, non è garantito che lo stesso corpo celeste abbia lo stesso *source_id* in *release* differenti.

- **RANDOM_INDEX:** *Random Index used to select subsets*
Indice che viene utilizzato per selezionare sottoinsiemi, più piccoli, dei corpi celesti. Il numero che rappresenta l'indice è un numero tra 0 e N-1, dove N è il numero dei corpi presenti nel catalogo analizzato.
- **REF_EPOCH:** Reference Epoch
Epoca di riferimento su cui si basano tutti i corpi, espressa in anni giuliani, unità di misura temporale equivalente a 365.25 giorni.
Nella Data Release 2 l'epoca di riferimento è sempre J2015.15, corrispondente al 2 Luglio 2015, alle ore 21:00:00 (TCB) ¹.
- **RA:** Right Ascension
Ascensione retta α del corpo nel sistema di riferimento ICRS all'epoca di riferimento.
L'ascensione retta si associa al sistema di coordinate equatoriali, infatti è analoga alla longitudine ma fa riferimento alla sfera celeste invece che a quella terrestre. È la distanza angolare, di un dato punto corrispondente ad un corpo, che si ha tra il meridiano di riferimento e il meridiano passante per il corpo analizzato, misurata lungo il parallelo passante per il corpo, muovendosi verso est.
La sua unità di misura sono i gradi (deg) che si ricavano da ore, minuti e secondi, dove 24 ore corrispondono ad una rotazione completa della Terra. 60 minuti di arco equivalgono ad 1°.
- **RA_ERROR:** *Standard Error of Right Ascension*
Errore standard dell'ascensione retta di un dato corpo, nel sistema di riferimento ICRS, all'epoca di riferimento. L'errore è misurato in *mas*, cioè in miliardesecondi, unità di misura che equivale a un millesimo di secondo d'arco.

¹*Barycentric Coordinate Time*, standard di coordinate temporali usato per calcoli inerenti orbite di pianeti, asteroidi, comete e satelliti nel sistema solare.

- DEC: *Declination*

Declinazione δ del corpo nel sistema di riferimento ICRS all'epoca di riferimento.

Rappresenta la latitudine proiettata sulla sfera celeste, anziché sulla superficie terrestre. È la distanza angolare di un dato punto corrispondente a un corpo, misurata lungo il meridiano posto lungo il corpo, partendo dall'equatore celeste. Anche la declinazione si misura in gradi (deg).

Le declinazioni dei corpi posti a Nord dell'equatore celeste sono, per convenzione, positive, mentre quelle dei corpi posti a Sud dell'equatore celeste sono negative.

Il sistema di coordinate della declinazione, a causa di alcuni moti millenari della Terra, si muove nel tempo, perciò è necessario specificare l'epoca di riferimento.

- DEC_ERROR: *Standard Error of Declination*

Errore standard della declinazione di un dato corpo, nel sistema di riferimento ICRS, all'epoca di riferimento.

L'errore viene misurato in *mas*, cioè in miliardosecondi.

- PARALLAX

Parallasse stellare assoluta del corpo all'epoca di riferimento.

La parallasse è quel fenomeno per cui si ha uno spostamento apparente di un corpo se si cambia il punto di osservazione, nello specifico è il movimento della Terra durante l'anno che causa questo cambiamento di posizione.

Si misura in miliardosecondi.

- PARALLAX_ERROR: *Standard Error of Parallax*

Errore standard della parallasse stellare all'epoca di riferimento. Viene misurato in miliardosecondi.

- PMRA: *Proper Motion in Right Ascension direction*

Moto proprio nella direzione dell'ascensione retta di un dato corpo, nel sistema di riferimento ICRS all'epoca di riferimento.

È la proiezione del piano tangente alla volta celeste del vettore del moto proprio, nella direzione di aumento dell'ascensione retta.

Il moto proprio è il moto apparente di un corpo celeste nel cielo, causato dal movimento effettivo della stella rispetto al baricentro del Sistema Solare. Infatti, a causa della diversa velocità di rotazione che il corpo ha rispetto al Sole, si va a generare questo moto apparente.

Può essere definito anche come il cambiamento angolare di un corpo, che avviene in un anno. Ed è formato da due componenti, la componente lungo l'ascensione retta e la componente lungo la declinazione. La sua unità di misura è il secondo d'arco per anno (*arcsec/yr*)

- *PMRA_ERROR: Standard Error of Proper Motion in Right Ascension direction*

Errore standard della proiezione del piano tangente alla volta celeste del vettore del moto proprio, nella direzione di aumento dell'ascensione retta, nell'epoca di riferimento. Si misura in secondo d'arco per anno (*arcsec/yr*).

- *PMDEC: Proper Motion in Declination direction*

Moto proprio nella direzione della declinazione di un dato corpo, all'epoca di riferimento.

È la proiezione del vettore del moto proprio nella direzione di aumento della declinazione.

La sua unità di misura è il secondo d'arco per anno (*arcsec/yr*).

- *PMDEC_ERROR: Standard Error of Proper Motion in Declination direction*

Errore standard della componente del moto proprio lungo la declinazione, all'epoca di riferimento.

Si misura in secondo d'arco per anno (*arcsec/yr*).

- *PHOT_G_MEAN_MAG: G - band mean magnitude*

Magnitudine media nella banda G.

Capitolo 3

Utilizzo di Python

Python è un linguaggio di programmazione che si adatta al meglio col lavoro che si andrà a svolgere.

Infatti Python ha a sua disposizione diversi pacchetti o moduli dei quali si può usufruire in base ad ogni tipo di esigenza.

Un modulo che risulterà molto importante è denominato *Astropy*.

Astropy permette di operare, tramite specifiche funzioni, all'interno dell'astronomia e dell'astrofisica.

Inoltre, un altro modulo che sarà molto utile a livello illustrativo, è *Matplotlib*. Questo modulo permette di elaborare diversi tipi di grafici, partendo dai dati che si hanno a disposizione.

Infatti, sarà d'aiuto nell'osservare i valori che assumeranno i vari parametri dei corpi analizzati.

3.1 Implementazione del Codice

L'obiettivo sarà quello di estrapolare qualche sottoinsieme di corpi celesti, dal catalogo DR2 di Gaia, per andarli ad analizzare.

Python, in questo caso, risulta molto utile in quanto permette di addentrarsi direttamente nel database di Gaia, grazie al modulo *Astropy*. Infatti, attraverso delle funzioni apposite, si compone la *query* desiderata (che risulterà leggermente diversa dalle *queries* implementate direttamente nell'archivio),

e, in uscita, Python fornisce i risultati in base ai parametri richiesti.

Viene di seguito mostrato un primo esempio:

```
import astropy.units as u
from astropy.coordinates.sky_coordinate import SkyCoord
from astropy.units import Quantity
from astroquery.gaia import Gaia

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

job = Gaia.launch_job_async("SELECT TOP 100 * \
FROM gaiadr2.gaia_source \
ORDER BY parallax")

a = job.get_results()

print(a['parallax'])
```

Con il termine *'import'* si vanno a importare i vari pacchetti che si desidera utilizzare per implementare il codice.

Il modulo *'astropy.units'* contiene delle funzioni utili per definire o effettuare conversioni tra unità fisiche.

'SkyCoord' permette di interfacciarsi con la rappresentazione e la manipolazione delle coordinate celesti.

Il modulo *'Quantity'*, permette di associare un numero ad un'unità.

Infine, il modulo *'astroquery'* permette di effettuare delle *queries* direttamente all'interno di certi *database*, in questo caso all'interno di Gaia.

Di seguito, è stato importato il pacchetto *'matplotlib'* che verrà utilizzato per generare grafici, e il pacchetto *'numpy'*, per poter realizzare semplici funzioni matematiche.

L'ultimo pacchetto importato è il pacchetto *'warnings'*, grazie al quale, con

l'apposita funzione *'filterwarnings'* e l'azione *'ignore'* che viene impostata, si chiede a Python di non visualizzare in output eventuali messaggi di avvertimento.

Si va quindi ad impostare la *query* desiderata. In questo caso vengono semplicemente richiesti 100 corpi facente parte del catalogo DR2 di Gaia, ordinati in ordine crescente secondo la parallasse.

Il simbolo *'\'* permette di collegare le linee della *query* fra di loro.

Si va poi a definire una variabile, in questo caso la lettera *'a'*, a cui associare i risultati che si ottengono in uscita dal database di Gaia.

Per visualizzare i risultati si utilizza la funzione *'print'*, e di seguito vengono mostrati i dati relativi alla parallasse.

In output si ottiene:

```
parallax
mas
-----
-1856.5755515129292
 -1786.996353992281
-1706.6965906548498
-1621.1691579012117
-1511.6861101705745
-1481.1277390779912
-1415.1069243170325
 -1389.419917680432
 -1387.839263282375
-1387.3036674318632
      . . .
-682.8520445225062
-680.3422804187986
-678.3793219439707
-677.1947136334452
-675.3924988029374
-675.2578488906503
-670.3066178780693
-667.4405745063697
```

```
-664.3260608926535  
-662.5306277223318  
Length = 100 rows
```

Per avere una conferma dei dati ottenuti, si può effettuare la stessa ricerca direttamente sull'archivio di Gaia.

Come si può notare dalla Figura 3.1 e 3.2 nella colonna della parallasse i primi e gli ultimi valori presenti nella colonna corrispondente a *'parallax'* sono gli stessi ottenuti su Python. Tutto ciò permette quindi di poter lavorare su questi risultati direttamente su Python.

3.2 Implementazione di Grafici

Ora si procede andando a realizzare una serie di grafici per visualizzare i risultati ottenuti.

3.2.1 Codice implementato

Il codice precedentemente impostato si va a modificare leggermente andando a cambiare la *query*, inserendo dei limiti ai corpi richiesti nel database.

```
import astropy.units as u
from astropy.coordinates.sky_coordinate import SkyCoord
from astropy.units import Quantity
from astroquery.gaia import Gaia

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

from astroquery.gaia import Gaia

job = Gaia.launch_job_async("SELECT TOP 100 * \
FROM gaiadr2.gaia_source \
WHERE 1=CONTAINS(\
    POINT('ICRS',ra,dec), \
    CIRCLE('ICRS',266.41683,-29.00781,2)) \
AND phot_g_mean_mag >=17 AND phot_g_mean_mag <22")

a = job.get_results()
```

In questo nuovo codice si richiedono sempre 100 corpi in uscita, ma cambiano le condizioni attraverso cui vengono estrapolati questi corpi.

Infatti qui i corpi sono selezionati all'interno di un regione circolare nel cielo (un cono nello spazio), che ha come centro il centro Galattico, cioè il centro

della nostra galassia, la Via Lattea.

Il sistema a cui si fa riferimento è il sistema *ICRS*. Le coordinate del centro sono espresse in funzione dell'ascensione retta e della declinazione, che sono i primi due valori che si trovano nella *query*, separati da una virgola, con ascensione retta pari a 266.41683° , e declinazione pari a -29.00781° .

Inoltre si inserisce un raggio, in questo caso scelto pari a 2° e, come ultima limitazione si chiede che i corpi in uscita abbiano un valore di magnitudine media G compresa tra $G = 17$ e $G = 22$.

3.2.2 Grafici ascensione retta e declinazione

Due primi grafici che si possono realizzare sono due istogrammi che rappresentano graficamente la distribuzione dei valori di ascensione retta e della declinazione, dei 100 corpi che abbiamo estrapolato dal database di Gaia.

Si realizza prima il grafico relativo all'ascensione retta:

```
plt.hist(a['ra'], bins = 50)

plt.xlabel('ra [deg]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Ascensione Retta')

plt.show()
```

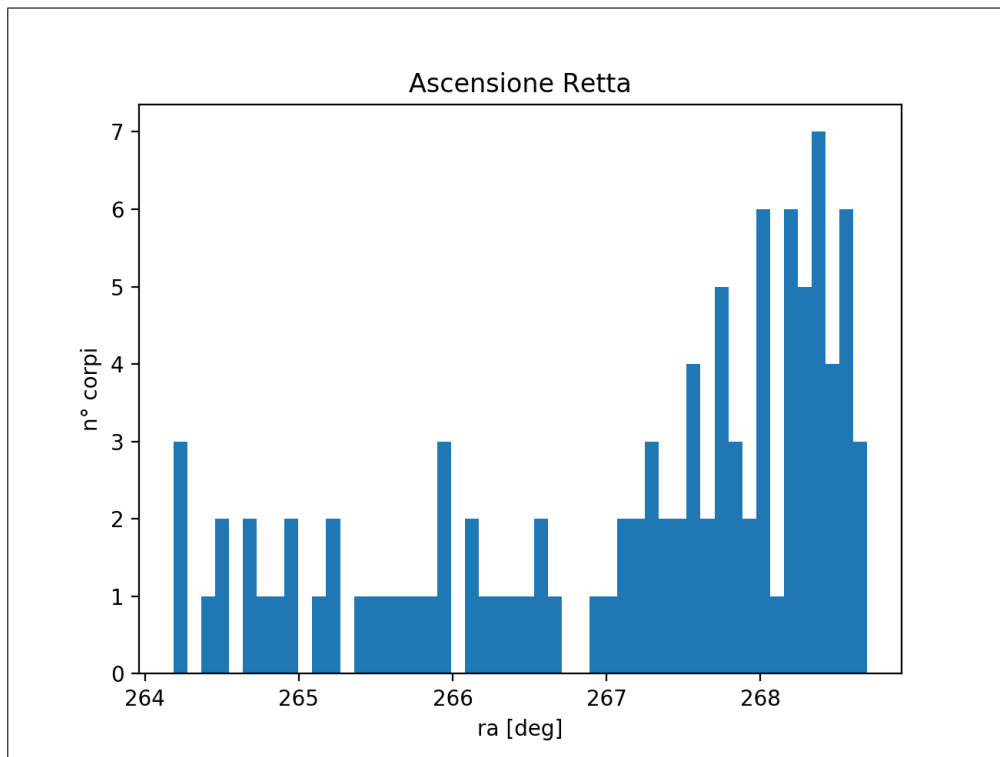


Figura 3.3: Istogramma dell'ascensione retta.

Poi si realizza il grafico della declinazione:

```
plt.hist(a['dec'], bins = 50)

plt.xlabel('dec [deg]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Declinazione')

plt.show()
```

Come si può analizzare dalla Figura 3.3, i valori dell'ascensione retta si dispongono in un *range* di angoli piuttosto elevati, compresi tra i valori 264 e 269.

Mentre i valori della declinazione, che si possono visualizzare nella Figura 3.4, sono compresi in un *range* di angoli compresi tra i valori -31 e -27.

Questi valori si potevano prevedere prestando attenzione ai valori che defi-

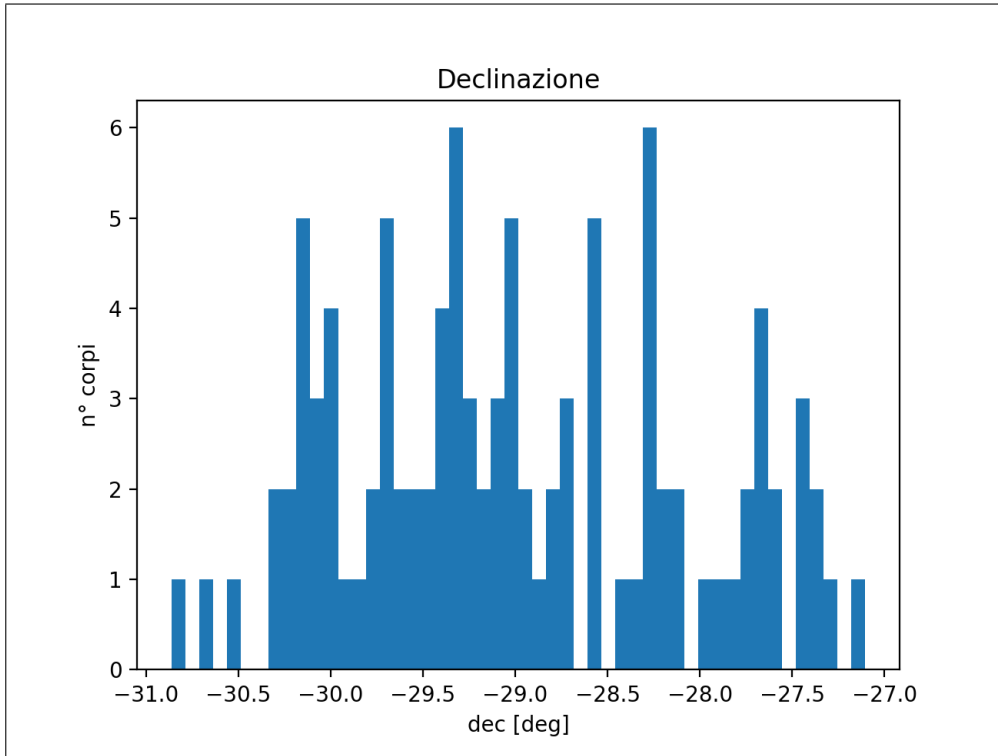


Figura 3.4: Istogramma della declinazione.

niscono il centro della galassia, i quali sono compresi nei *range* di ascensione retta e declinazione.

Inoltre, l'ascensione retta e la declinazione possono essere messi in relazione implementando un grafico di tipo 'Scatter', che si può osservare nella Figura 3.5:

```
plt.scatter(a['ra'], a['dec'], color='b')
```

```
plt.xlabel('ra□[deg]')
plt.ylabel('dec□[deg]')
```

```
plt.show()
```

Altri due istogrammi poi possono essere realizzati per valutare gli errori relativi all'ascensione retta e alla declinazione.

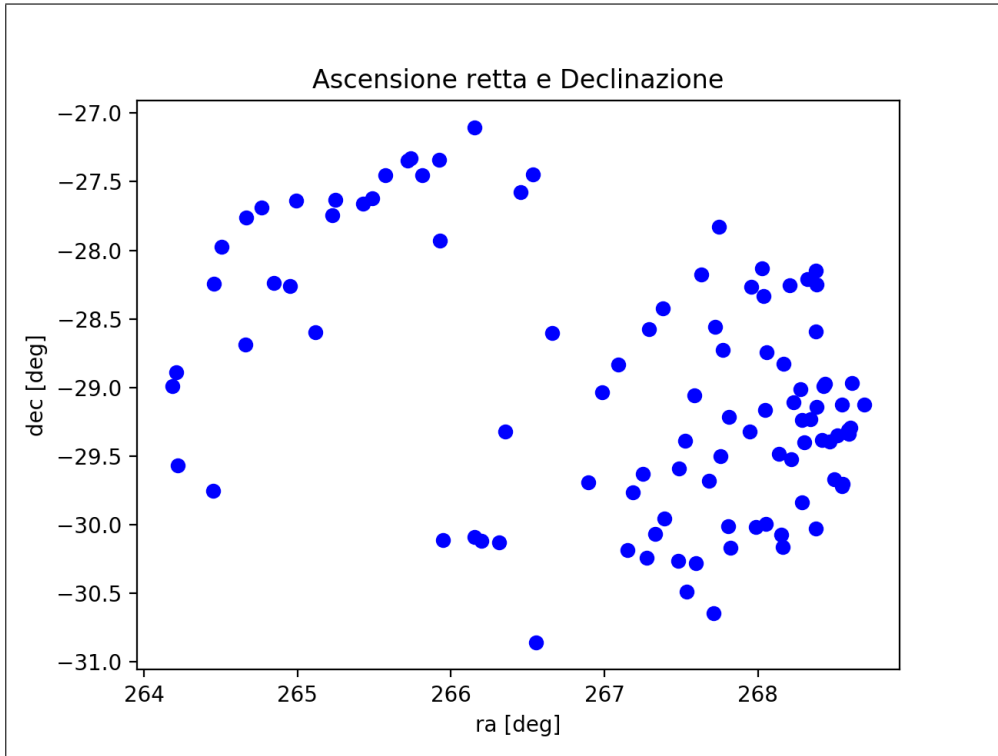


Figura 3.5: Grafico scatter, relazione tra ascensione retta e declinazione.

Tutti gli errori standard vanno a raggruppare gli effetti dati dagli strumenti e gli errori dati dalla calibrazione degli strumenti posti sulla Terra.

```
plt.hist(a['ra_error'], bins=1000)

plt.xlabel('ra_error [mas]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.xlim(0,2)
plt.title('Errori ascensione retta')

plt.show()
```

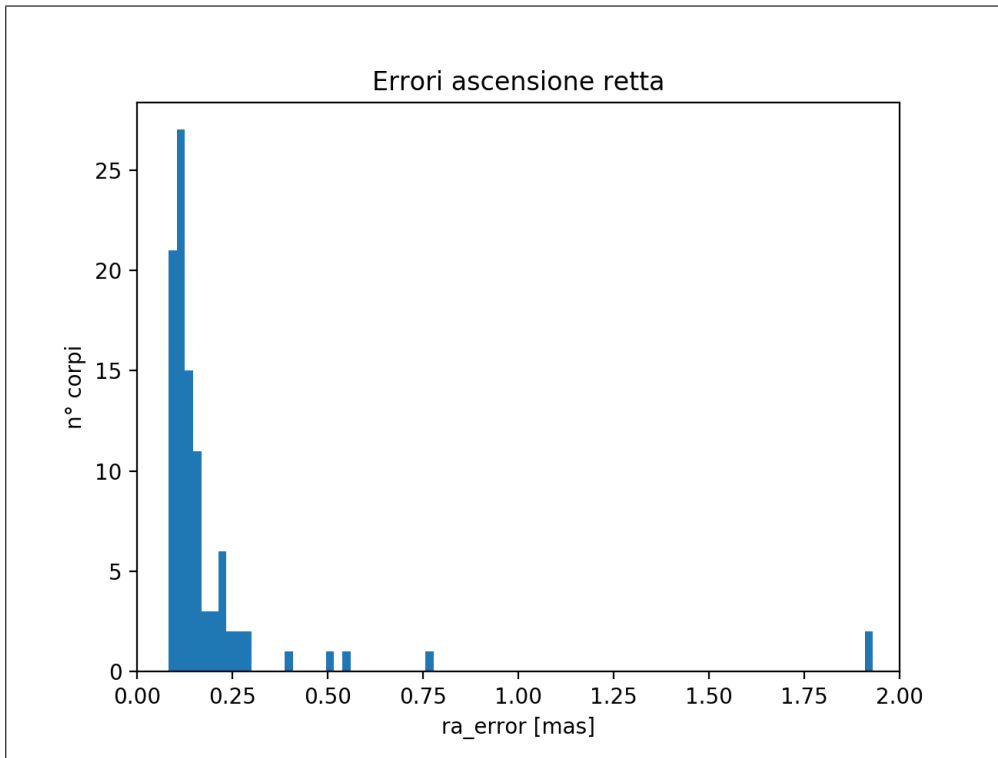


Figura 3.6: Istogramma degli errori dell'ascensione retta.

```
plt.hist(a['dec_error'], bins=1000)

plt.xlabel('dec_error [mas]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.xlim(0,2)
plt.title('Errori declinazione')

plt.show()
```

Come si può notare dai grafici presenti nelle Figure 3.6 e 3.7, la maggior parte degli errori ha valori molto piccoli, poco superiori a 0. Sono presenti, però, alcuni errori che raggiungono valori più elevati, ma si tratta comunque di qualche caso isolato.

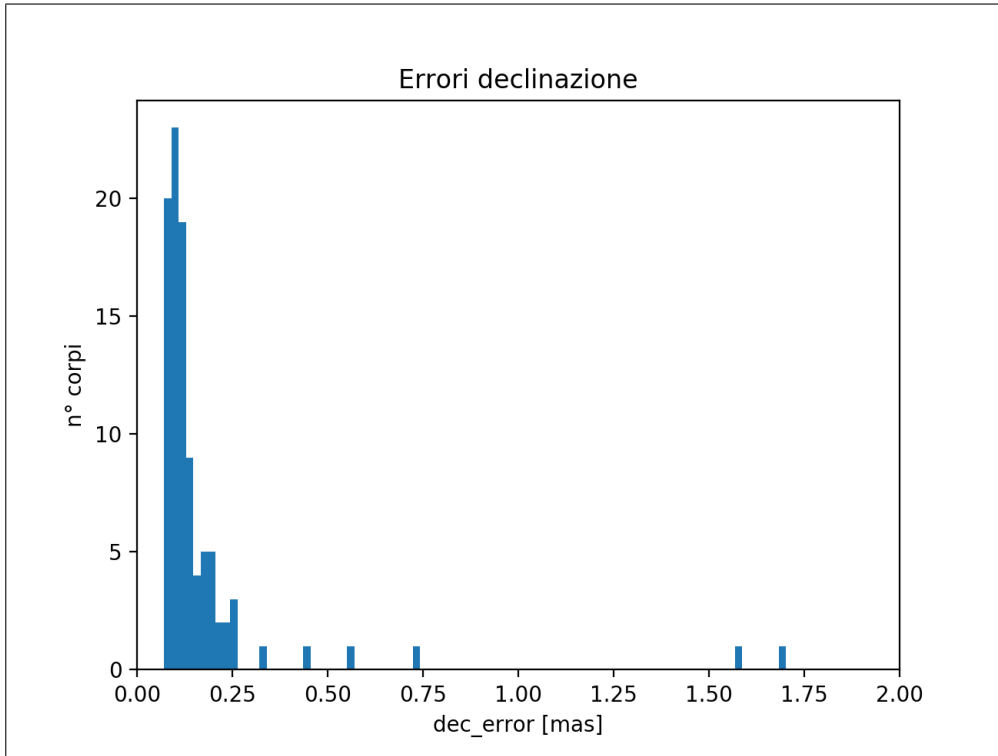


Figura 3.7: Istogramma degli errori della declinazione.

3.2.3 Grafici moto proprio

Si procede poi col realizzare un grafico che rappresenta il moto proprio dei corpi, posto in Figura 3.8.

Si mettono quindi in relazione i valori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta e i valori del moto proprio nella direzione della declinazione.

```
plt.scatter(a['pmra'], a['pmdec'], color='b')
```

```
plt.xlabel('pmra [mas/yr]')
```

```
plt.ylabel('pmdec [mas/yr]')
```

```
plt.show()
```

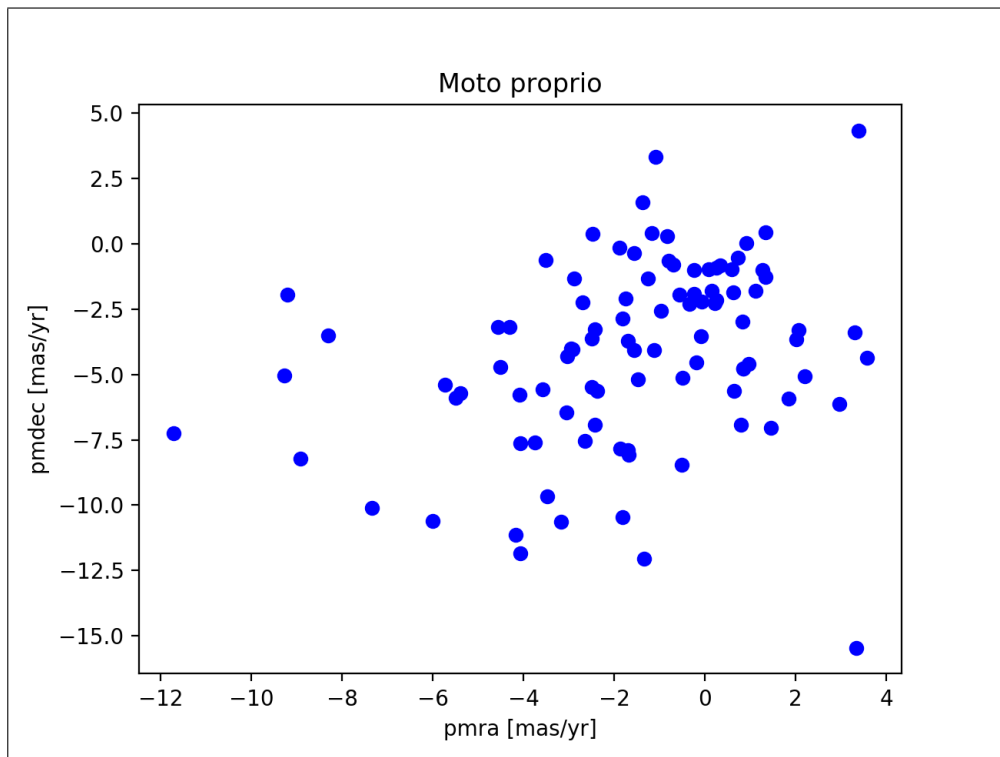


Figura 3.8: Grafico Scatter, pmra e pmdec.

Poi, si realizzano gli istogrammi relativi agli errori delle due componenti del moto proprio.

Per primo si implementa l'istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta, che si può visualizzare nella Figura 3.9.

```
plt.hist(a['pmra_error'], bins=50)
```

```
plt.xlabel('pmra_error [mas/yr]')
```

```
plt.ylabel('n corpi')
```

```
plt.title('Errore pmra')
```

```
plt.show()
```

Implementiamo poi l'istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione della declinazione, presente in Figura 3.10.

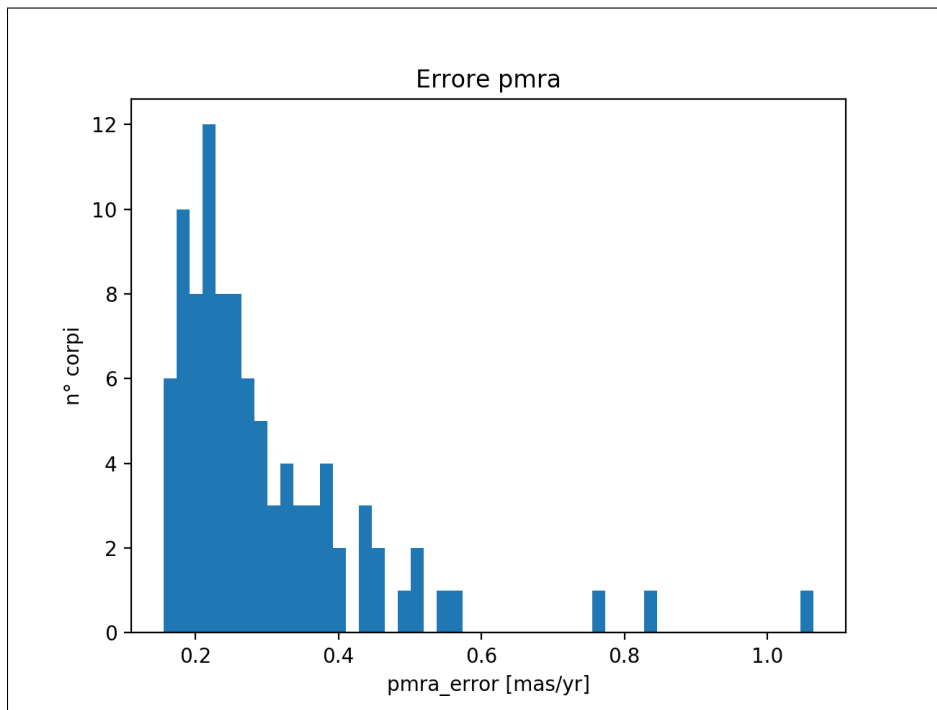


Figura 3.9: Istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.

```
plt.hist(a['pmdec_error'], bins=50)

plt.xlabel('pmdec_error [mas/yr]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Errore pmdec')

plt.show()
```

Anche qui si nota che la maggior parte degli errori, sia nella direzione dell'ascensione retta che della declinazione assumono valori molto piccoli, si ha solo qualche piccola eccezione.

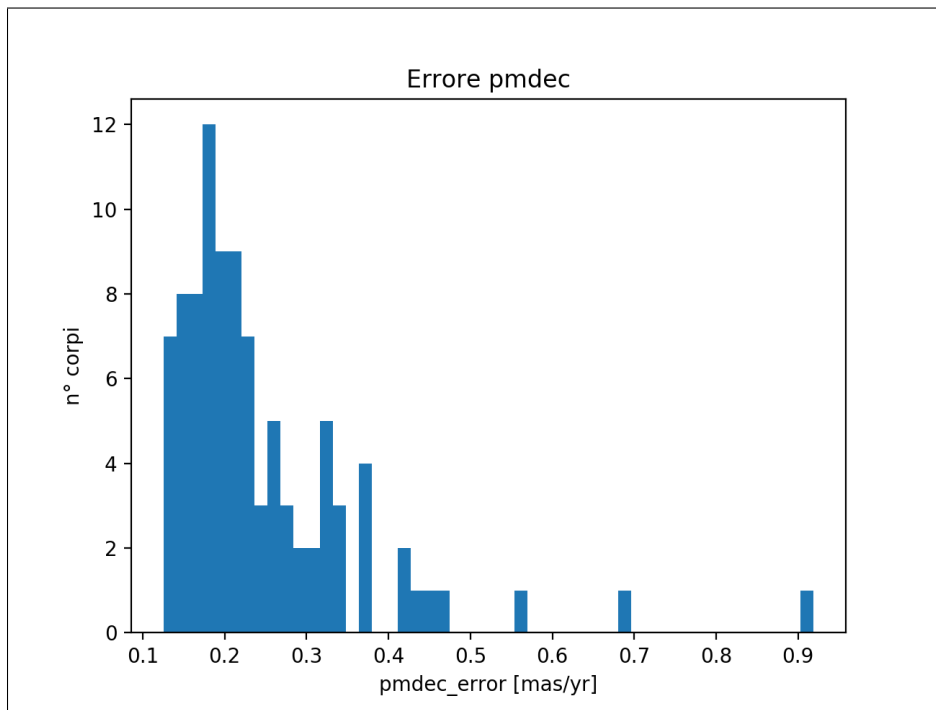


Figura 3.10: Istogramma relativo agli errori del moto proprio nella direzione della declinazione.

3.2.4 Grafici parallasse

Infine, un ultimo grafico che si può realizzare è quello relativo alla parallasse ed ai suoi errori, presenti nelle Figure 3.11 e 3.12.

```
plt.hist(a['parallax'], bins=50)
```

```
plt.xlabel('parallax [mas]')
```

```
plt.ylabel('n corpi')
```

```
plt.title('Parallasse')
```

```
plt.show()
```

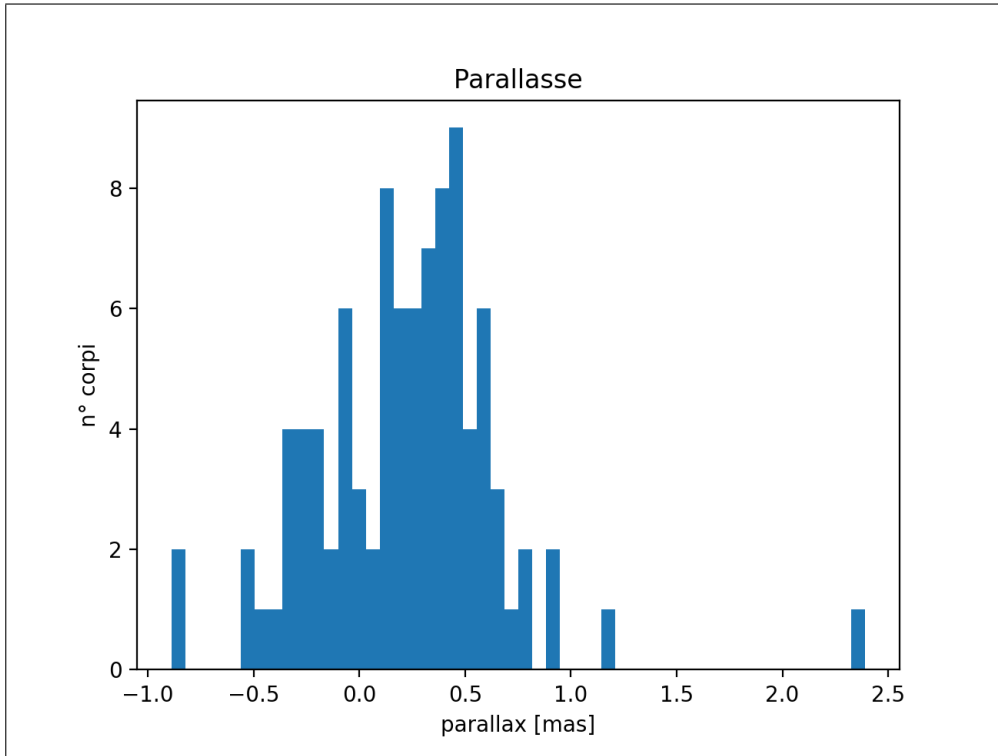


Figura 3.11: Istogramma relativo alla parallasse

```
plt.hist(a['parallax_error'], bins=50)

plt.xlabel('parallax_error [mas]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Errori parallasse')

plt.show()
```

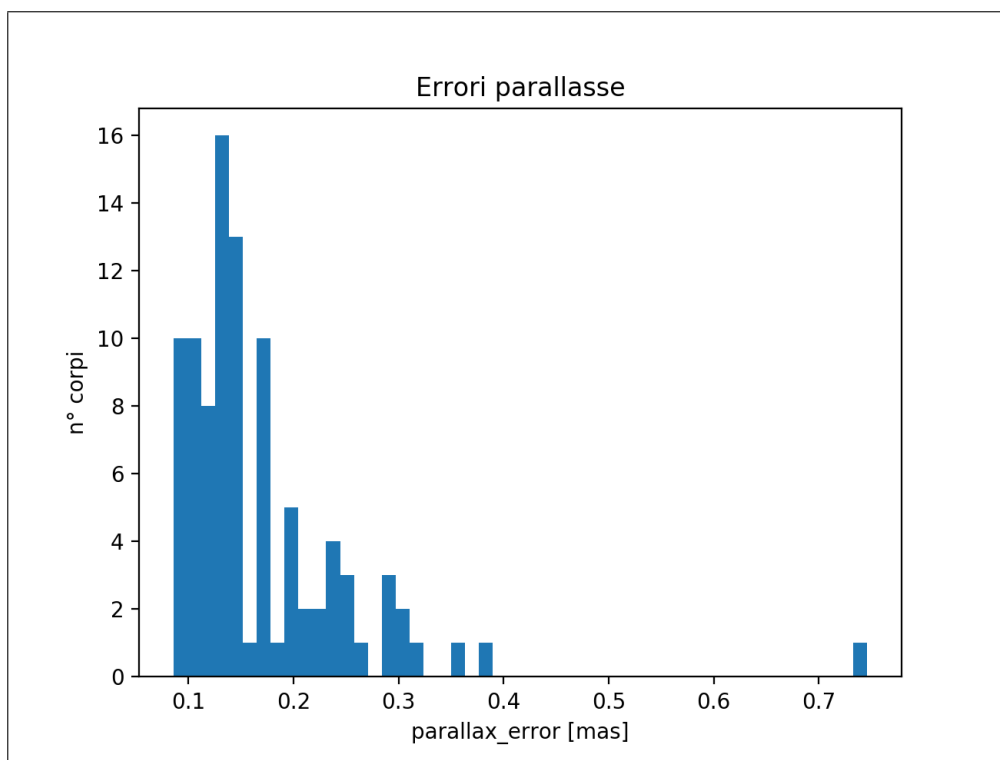


Figura 3.12: Istogramma relativo agli errori della parallasse

Capitolo 4

Implementazione Sottoinsiemi di maggiori dimensioni

Per analizzare al meglio i dati presenti nel database di Gaia, si procede andando a realizzare una *query* che restituisce un insieme con un numero più elevato di corpi, rispetto al precedente realizzato.

4.1 Sottoinsieme con 10 000 corpi

Si procede ora andando a chiedere in uscita al database un numero di corpi pari a 10 000.

```
import astropy.units as u
from astropy.coordinates.sky_coordinate import SkyCoord
from astropy.units import Quantity
from astroquery.gaia import Gaia

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

from astroquery.gaia import Gaia
```

```
job = Gaia.launch_job_async("SELECT TOP 10000
ra, dec, pmra, pmdec, ra_error,
dec_error, pmra_error, pmdec_error,
phot_g_mean_mag, parallax, parallax_error\
FROM gaiadr2.gaia_source\
ORDER BY phot_g_mean_mag")

b = job.get_results()
```

In questo codice sono stati richiesti in uscita dal database, i 10 000 corpi più luminosi presenti nel catalogo DR2 di Gaia.

Viene chiesto di fornire i valori relativi a:

- ascensione retta,
- declinazione,
- moto proprio nelle direzioni dell'ascensione retta e della declinazione,
- parallasse,
- magnitudine media G,
- errori relativi.

L'unica condizione richiesta è quella di ordinare i corpi in uscita secondo la magnitudine G, in ordine crescente, in modo così da analizzare i corpi più luminosi catalogati in Gaia. Infine, si va ad attribuire la variabile 'b' ai risultati dati dal codice.

Si procede ora realizzando qualche grafico.

4.1.1 Grafici ascensione retta e declinazione

Un primo grafico è di tipo *Scatter*, e va a mettere in relazione l'ascensione retta e la declinazione.

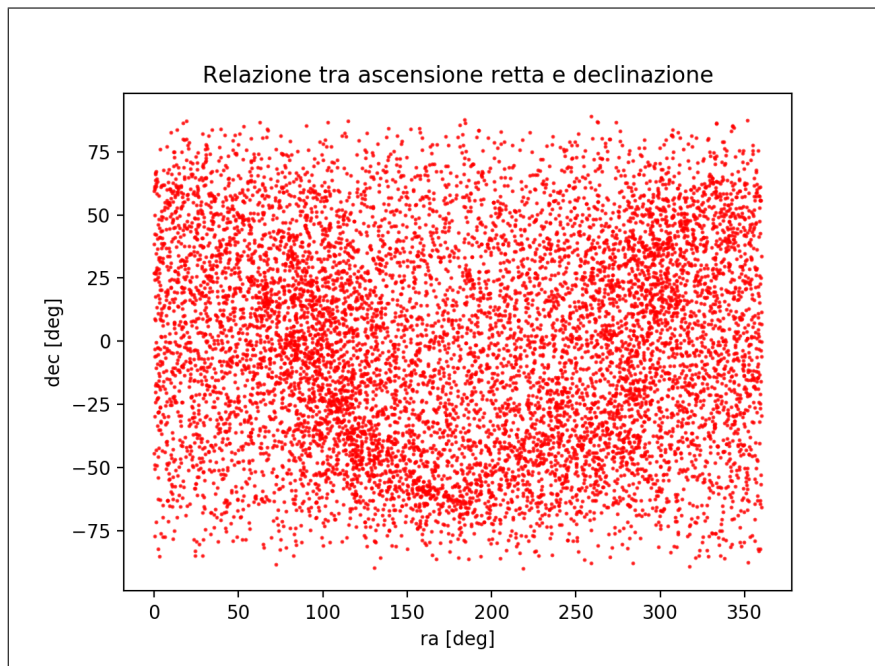


Figura 4.1: Relazione tra Ascensione retta e declinazione di 10 000 corpi.

```
plt.scatter(b['ra'], b['dec'], color= 'r', marker='.',
s=5, alpha=0.7)

plt.xlabel('ra [deg]')
plt.ylabel('dec [deg]')
plt.title('Relazione tra ascensione retta e declinazione')

plt.show()
```

Il termine *alpha* fornisce trasparenza ai punti che formano il grafico. Si noti, dalla Figura 4.1, che i corpi più luminosi hanno valori di ascensione retta e declinazione molto vari tra di loro. Osservando attentamente, però, si può notare una linea curva più marcata che sta a significare una maggior presenza di corpi in quei dati valori di ascensione retta e declinazione.

Visualizziamo ora gli errori relativi all'ascensione retta e alla declinazione attraverso un istogramma.

```
plt.hist(b['ra_error'], bins=2000, color='r')

plt.xlabel('ra_error [mas]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Errori ascensione retta')

plt.show()
```

```
plt.hist(b['dec_error'], bins=2000, color='r')

plt.xlabel('dec_error [mas]')
plt.ylabel('n corpi')
plt.title('Errori declinazione')

plt.show()
```

Come si può notare dai grafici in Figura 4.2 e 4.3, buona parte dei corpi presenti in questo sottoinsieme ha errori relativi di ascensione retta e declinazione molto piccoli.

Si ha solo qualche caso su 10 000 analizzati che assume errori con valori poco più elevati.

Per cui, questi errori non vanno a influenzare negativamente i risultati ottenuti.

Se si vuole trovare la media e lo scarto quadratico medio degli errori di ascensione e declinazione si utilizza il pacchetto *numpy* di Python.

```
m = np.mean(b['ra_error'])
s = np.std(b['ra_error'])

print(m)
print(s)
```

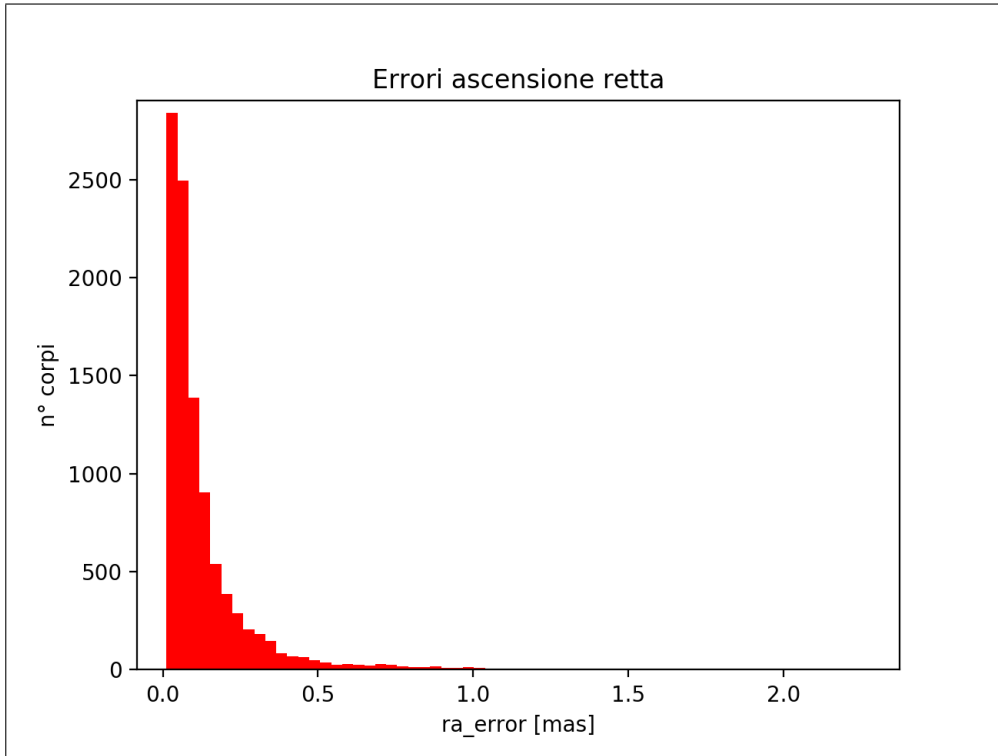


Figura 4.2: Istogramma sugli errori dell'ascensione retta.

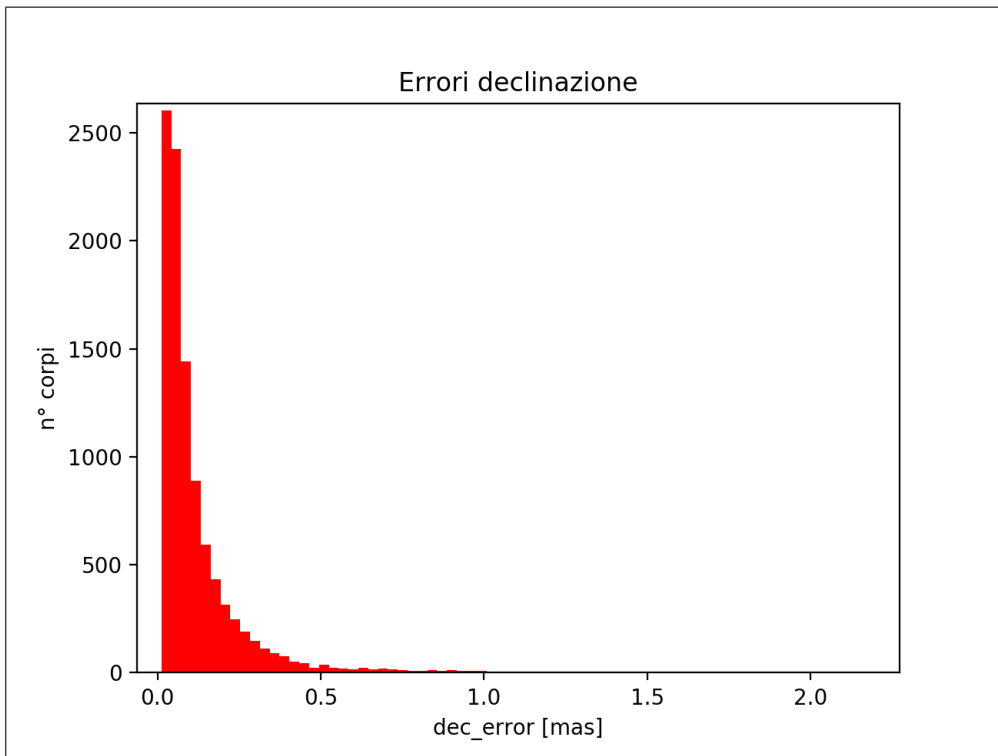


Figura 4.3: Istogramma sugli errori della declinazione.

La funzione 'mean' restituisce la media di tutti i valori di errore dell'ascensione retta, mentre la funzione 'std' restituisce la deviazione standard.

I risultati che si ottengono sono $m = 0.144$ mas per il valore medio e $\sigma = 0.818$ mas per la deviazione standard.

Da questi risultati si può dedurre che gli errori dell'ascensione retta sono più dispersi rispetto a quanto si potrebbe pensare osservando il valore medio ottenuto.

Utilizziamo le stesse funzioni per analizzare gli errori relativi alla declinazione.

Si ottiene $m = 0.133$ mas e $\sigma = 0.739$ mas.

Anche qui si nota che il valore medio degli errori è molto piccolo, ma valutando la deviazione standard il valore aumenta. Questo è dato dal fatto che la quantità degli errori analizzati è molto elevata.

4.1.2 Grafici moto proprio

Si procede andando ad analizzare i grafici relativi al moto proprio nelle due direzioni di ascensione retta e declinazione.

In questo grafico, però, si mettono in relazione le componenti del moto proprio di questo sottoinsieme, formato da 10 000 corpi, e del primo sottoinsieme analizzato, formato da 100 corpi, che aveva centro coincidente col centro della Via Lattea.

Si procede, quindi, inserendo i risultati ottenuti da entrambi i sottoinsiemi in un unico grafico di tipo *Scatter*.

Di seguito viene mostrato il codice per realizzare questo grafico.

```
plt.scatter(b['pmra'], b['pmdec'], color='r', s=2,
alpha=0.3)
plt.scatter(a['pmra'], a['pmdec'], color='b', s=2)
plt.xlabel('pmra [mas/yr]')
plt.ylabel('pmdec [mas/yr]')
plt.title('Moto proprio')
```

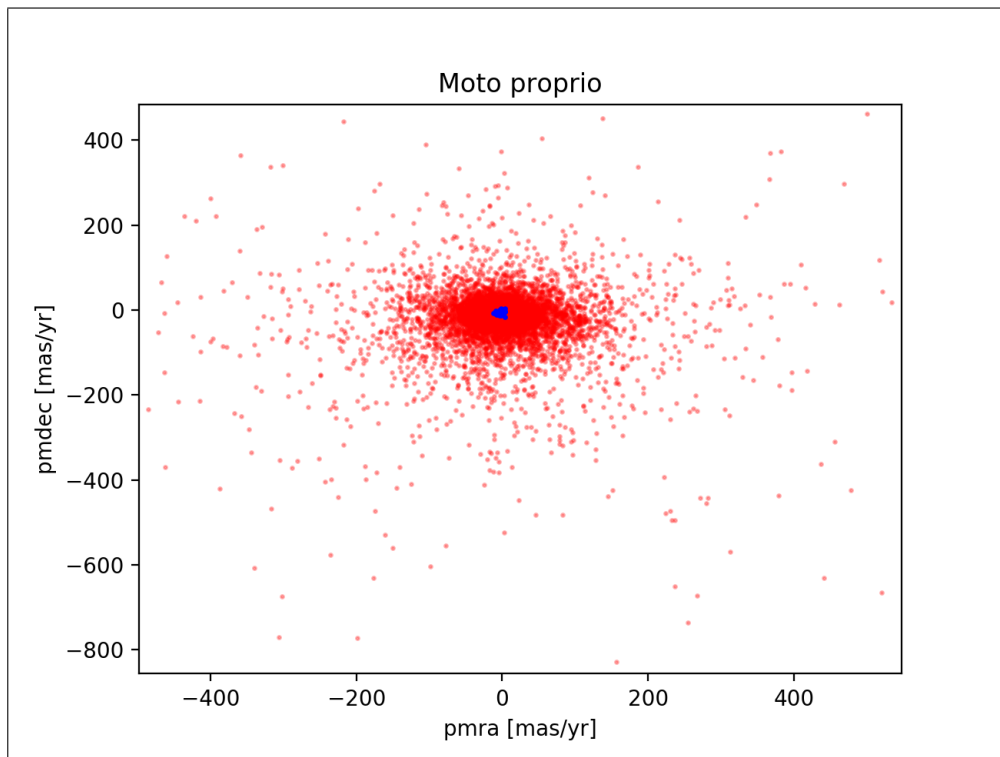



Figura 4.4: Relazione tra il moto proprio di due diversi sottoinsiemi.

```
plt.show()
```

Si nota, dalla Figura 4.4, che la maggior parte dei corpi si addensano in una zona centrale.

Il valore medio del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $m = 1.27$ mas/yr, mentre quello nella direzione della declinazione è pari a $m = -17.67$ mas/yr.

La deviazione standard corrispondente al moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $\sigma = 141.99$ mas/yr, quella relativa al moto proprio nella direzione della declinazione è $\sigma = 127.86$ mas/yr.

I valori medi trovano una corrispondenza nel rispettivo grafico mentre, per quanto riguarda la deviazione standard, i valori ottenuti indicano che ci sono anche diversi corpi i cui valori di moto proprio nelle due direzioni sono molto maggiori del valore medio.

Viene realizzato poi il grafico relativo agli errori, posto in Figura 4.5, dove si nota che la maggior parte degli errori assume valori molto piccoli.

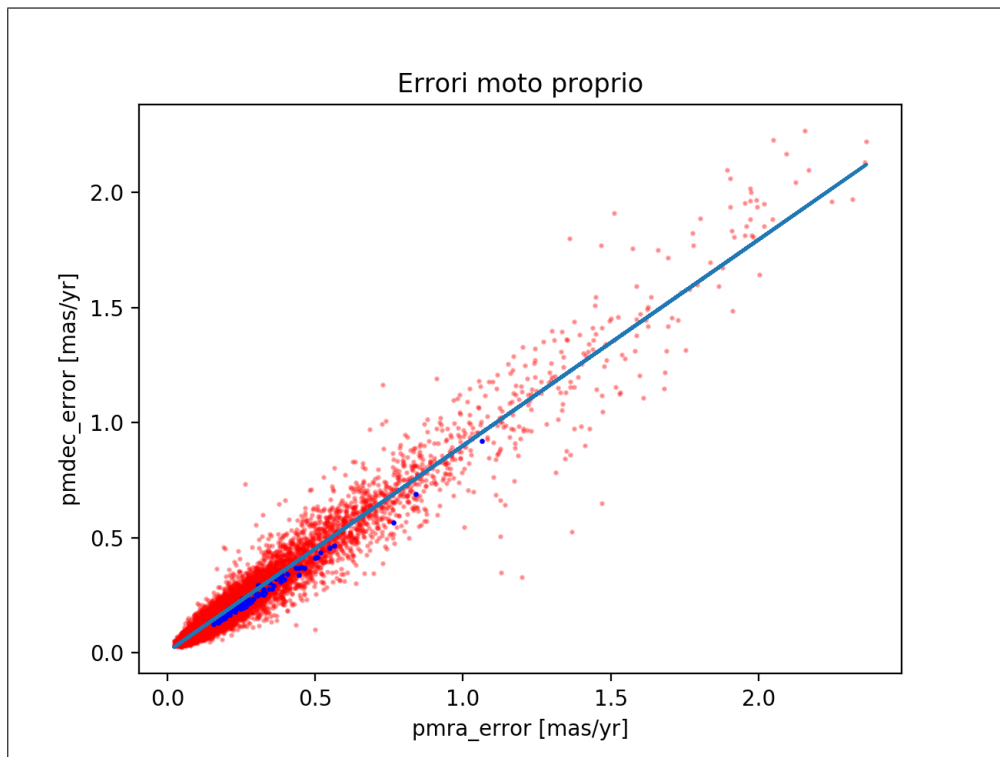


Figura 4.5: Relazione tra gli errori del moto proprio con regressione lineare.

Il valore medio dell'errore del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $m = 0.243$ mas/yr, mentre quello nella direzione della declinazione è $m = 0.222$ mas/yr.

La deviazione standard dell'errore del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $\sigma = 0.261$ mas/yr, mentre quella dell'errore del moto proprio nella direzione della declinazione è $\sigma = 0.240$ mas/yr.

Entrambi i valori trovano una corrispondenza nel grafico, e dai valori ottenuti della deviazione standard si nota che tutti gli errori sono molto piccoli. Inoltre, se si vuole analizzare la relazione tra gli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta con quelli nella direzione della declinazione si effettua una regressione lineare, che si va a confrontare direttamente sempre in Figura 4.5

Anche questo calcolo si può implementare grazie all'utilizzo di una funzione presente nel pacchetto *scipy* di Python.

```
from scipy import stats
```

```
varx = (c['pmra_error'])
vary = (c['pmdec_error'])
slope, intercept, r_value, p_value, std_err =
stats.linregress(varx, vary)

mask = ~np.isnan(varx) & ~np.isnan(vary)
slope, intercept, r_value, p_value, std_err =
stats.linregress(varx[mask], vary[mask])
```

Nel codice si chiede inoltre di nascondere eventuali valori inesistenti dei due parametri analizzati, relativi agli errori del moto proprio.

In uscita si ottiene una pendenza $\text{slope} = 0.89$ e un valore di $\text{intercept} = 0.005$.

Si procede con l'analizzare questi valori anche in alcuni istogrammi.

In Figura 4.6 e 4.7 si hanno gli istogrammi relativi alle due direzioni del moto proprio, mentre nelle figure 4.8 e 4.9 sono presenti gli istogrammi degli errori.

Osservando i grafici si può notare la corrispondenza con i valori medi ottenuti in precedenza.

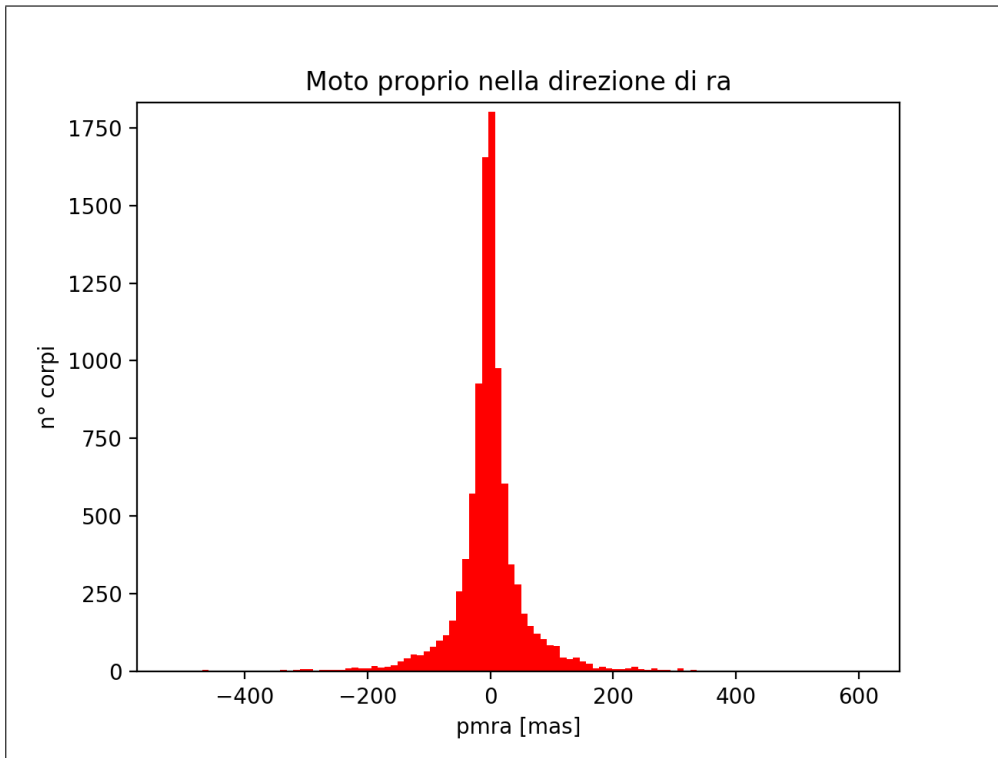


Figura 4.6: Moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.

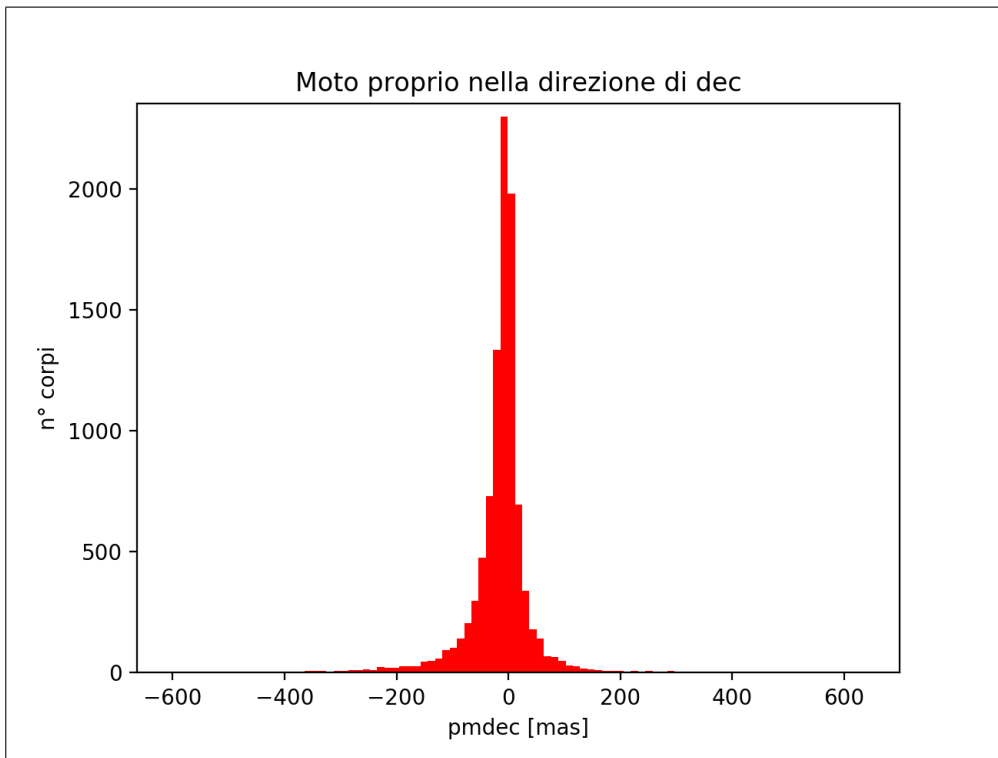


Figura 4.7: Moto proprio nella direzione della declinazione.

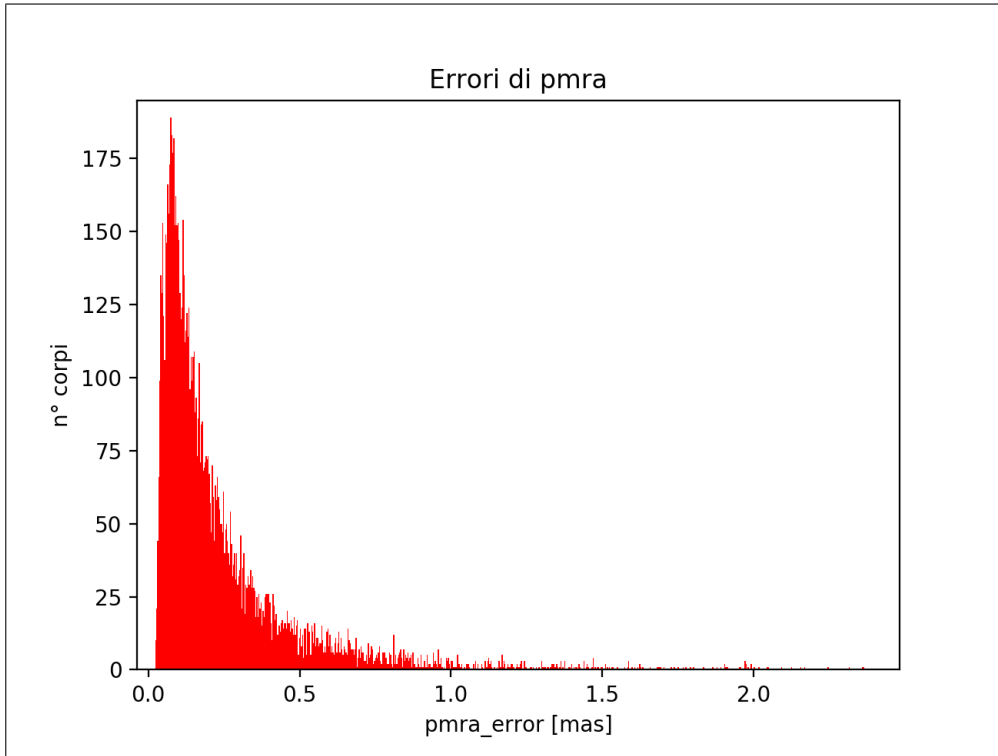


Figura 4.8: Istogramma degli errori del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta.

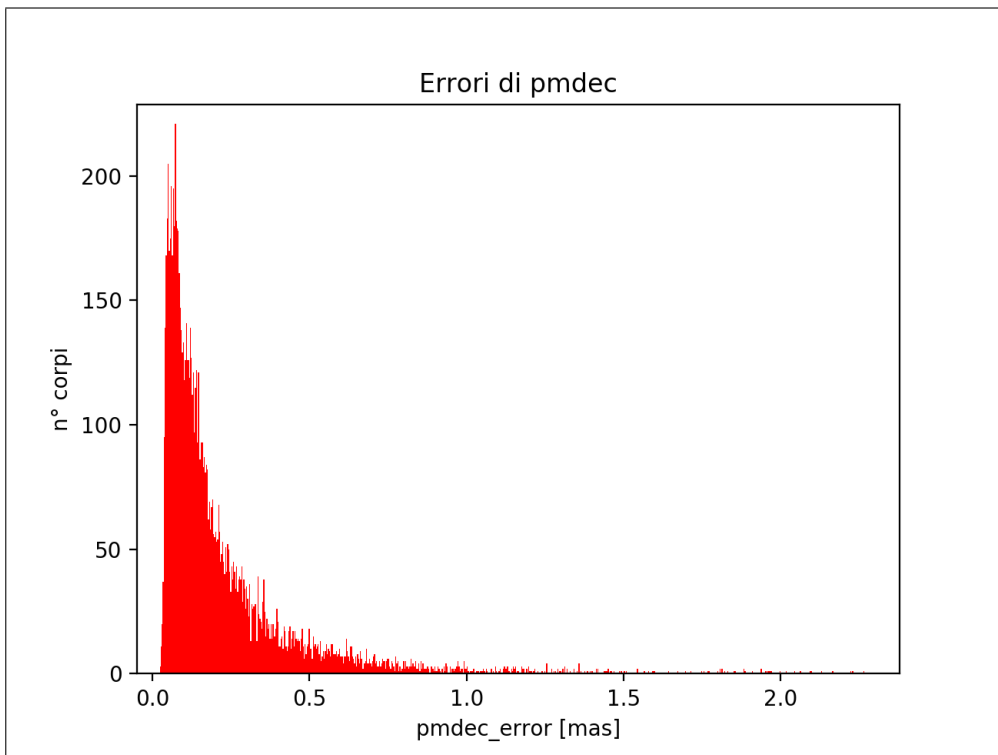


Figura 4.9: Istogramma degli errori del moto proprio nella direzione della declinazione.

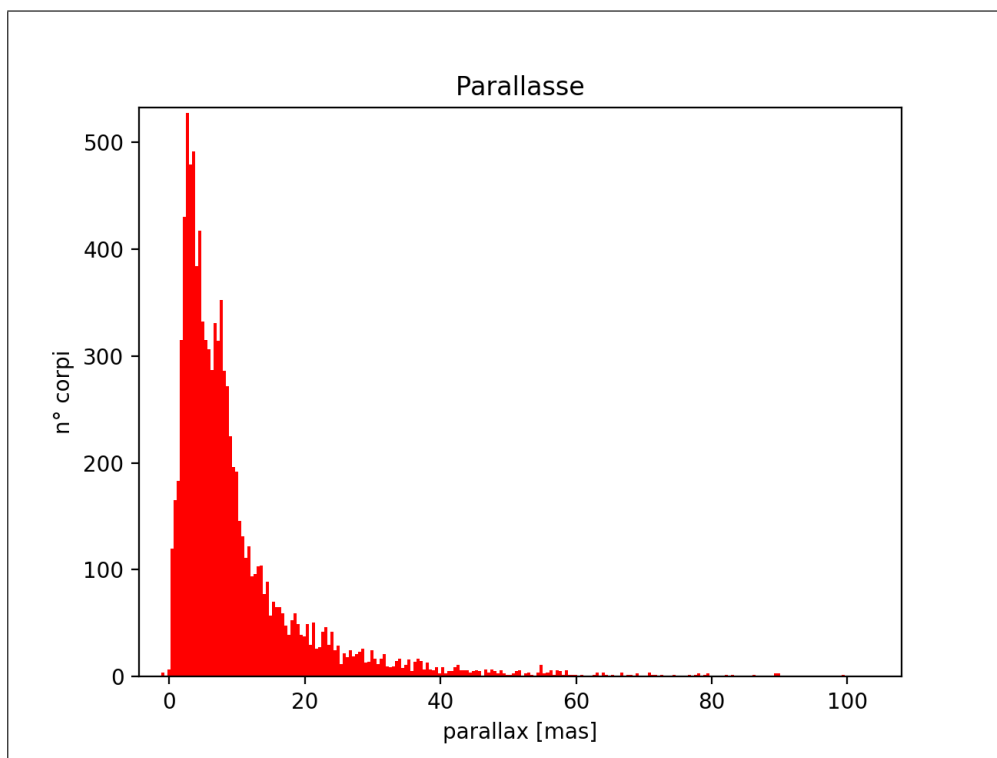


Figura 4.10: Istogramma relativo alla parallasse.

4.1.3 Grafici parallasse

Un ulteriore grafico da poter analizzare è quello relativo alla parallasse, posto in Figura 4.10.

Si può notare che la maggior parte dei valori di parallasse si trova ad un valore minore di 20 mas, e infatti si trova che il valore medio è $m = 10.83$ mas, mentre la deviazione standard di questo parametro è $\sigma = 15.61$ mas.

Da Figura 4.11 poi si possono analizzare gli errori. La maggior parte degli errori si dispone in un intervallo tra 0 mas e 0.2 mas e, procedendo verso errori aventi valori maggiori di 0.2 mas, il numero dei corpi cala notevolmente. Il valore medio di questo errore è $m = 0.147$ mas, mentre la deviazione standard di questo errore è pari a $\sigma = 0.159$ mas.

Entrambi i valori sono molto piccoli e non si discostano molto l'uno dall'altro, il che corrisponde a una qualità di valori molto elevata e ad un'ottima precisione nelle misurazioni effettuate.

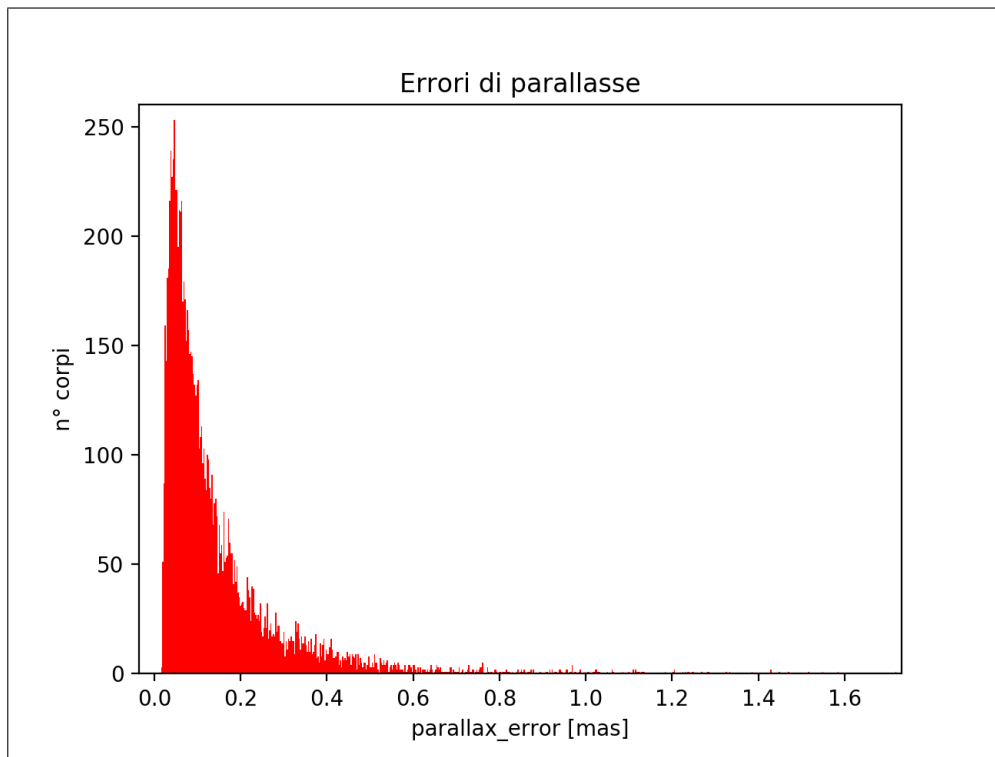


Figura 4.11: Istogramma relativo agli errori della parallasse.

4.1.4 Grafici magnitudine G

Si analizza ora un ultimo parametro che non va tralasciato in questo studio, ossia la magnitudine G descritta nella DR2 di Gaia.

Viene implementato il grafico relativo alla magnitudine G, di questo ultimo sottoinsieme formato da 10 000 corpi, che si può visualizzare in Figura 4.12.

Si nota che il massimo valore di magnitudine è $G = 6.33$ mag (si calcola grazie alla funzione 'max' presente in Python).

Si può osservare, inoltre, che il picco di corpi si ha proprio intorno a questo valore di magnitudine.

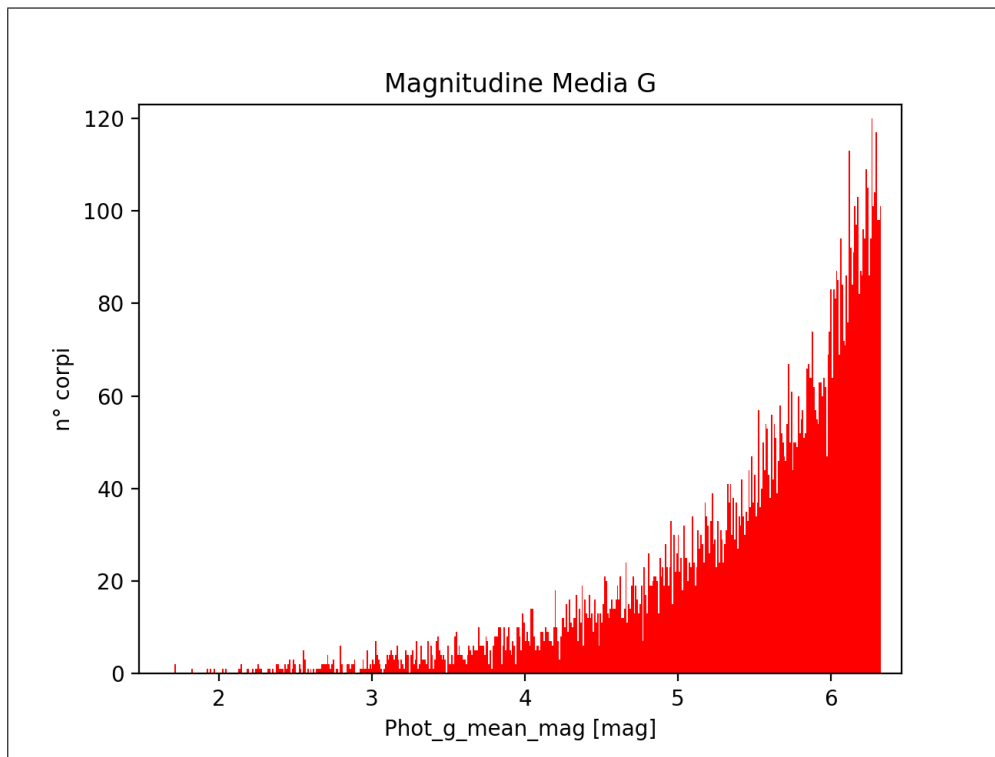


Figura 4.12: Istogramma relativo alla magnitudine G.

4.2 Sottoinsieme con 50 000 corpi

Si procede ora col realizzare un ultimo sottoinsieme, formato da 50 000 corpi, e si vanno a mettere in relazione i risultati ottenuti da questo sottoinsieme con quelli ottenuti nel sottoinsieme avente 10 000 corpi.

```
import astropy.units as u
from astropy.coordinates.sky_coordinate import SkyCoord
from astropy.units import Quantity
from astroquery.gaia import Gaia

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

from astroquery.gaia import Gaia
```



```

job = Gaia.launch_job_async("SELECT TOP 50000
ra, dec, ra_error, dec_error, pmra,
pmdec, pmra_error, pmdec_error,
phot_g_mean_mag, parallax, parallax_error\
FROM gaiadr2.gaia_source\
WHERE ra_error < 0.5 AND\
dec_error < 0.5
ORDER BY phot_g_mean_mag")

c = job.get_results()

```

Il codice implementato richiede in uscita 50 000 corpi provenienti dal catalogo DR2 di Gaia.

I parametri richiesti sono gli stessi richiesti nel codice precedente, avente in uscita 10 000 corpi.

Le condizioni richieste sono quelle di avere entrambi i valori degli errori di ascensione retta e declinazione inferiori a 0.5 mas, con l'obiettivo di analizzare solo corpi che non hanno errori di ascensione retta e declinazione troppo elevati, così da avere una qualità elevata (per quanto riguarda le misurazioni compiute) dei corpi analizzati.

Inoltre, si richiede sempre di ordinare i corpi secondo la magnitudine G, in modo così da analizzare i corpi più luminosi.

Si va poi ad attribuire la variabile 'c' ai risultati ottenuti da questa *query*.

4.2.1 Grafici ascensione retta e declinazione

Si procede subito col riportare i risultati ottenuti dagli ultimi due sottoinsiemi analizzati.

Di seguito viene scritto il codice per realizzare il grafico *Scatter* di ascensione retta e declinazione.

```

plt.scatter(c['ra'], c['dec'], color='g', marker='.',
s=3, alpha=0.6)

```

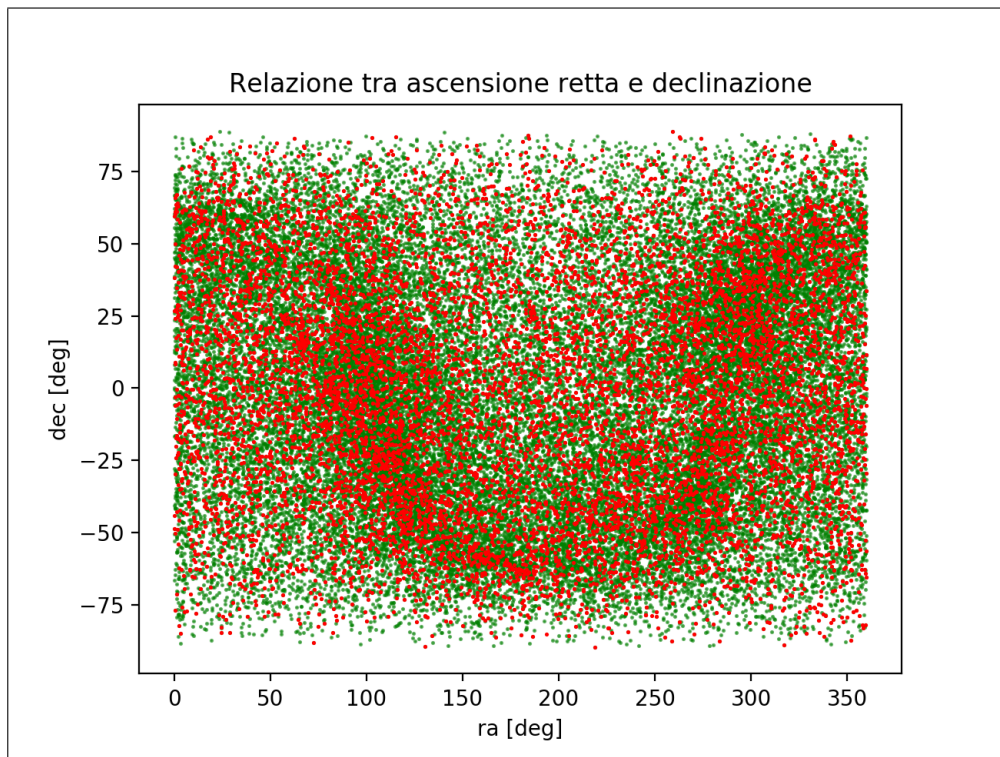


Figura 4.13: Grafico Scatter di ascensione retta e declinazione che relaziona i due sottoinsiemi.

```
plt.scatter(b['ra'], b['dec'], color='r', marker='.',
s=3)

plt.xlabel('ra [deg]')
plt.ylabel('dec [deg]')
plt.title('Relazione tra ascensione retta e declinazione')

plt.show()
```

Come si può notare da Figura 4.13 i punti verdi, corrispondenti ai 50 000 corpi del secondo sottoinsieme, occupano gran parte del grafico.

La zona dove i corpi si erano addensati maggiormente durante l'analisi del primo sottoinsieme, è la stessa anche per il secondo sottoinsieme.

Ciò significa che una buona parte dei corpi ha valori simili di ascensione retta e declinazione.

Si procede ora con l'analizzare anche gli errori relativi ad ascensione retta

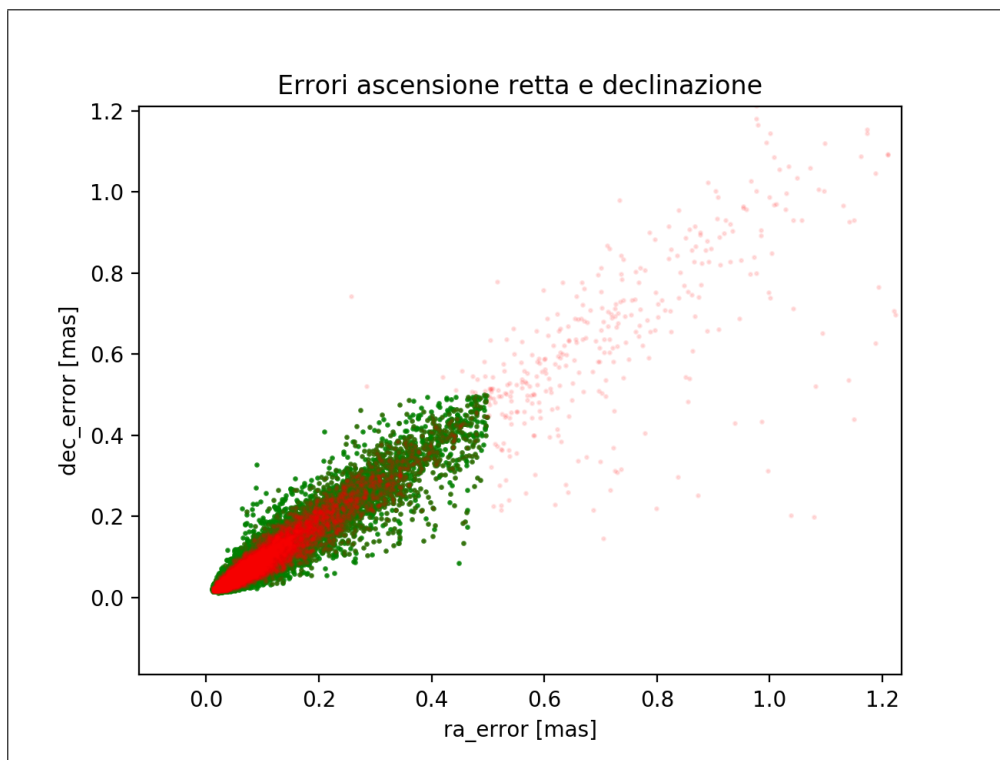


Figura 4.14: Grafico Scatter degli errori di ascensione retta e declinazione che relaziona i due sottoinsiemi.

e declinazione.

Da Figura 4.14, si nota che gli errori del secondo sottoinsieme sono racchiusi in un quadrato di lato 0.5, corrispondente al valore massimo che possono assumere gli errori di ascensione retta e declinazione.

Dato, inoltre, il numero più elevato di corpi analizzati, la scia formata dai corpi del secondo sottoinsieme tende ad aumentare di grandezza.

Il valore medio dell'errore dell'ascensione retta è pari a $m = 0.06$ mas, mentre la sua deviazione standard è uguale a $\sigma = 0.062$ mas.

La media assume un valore piuttosto basso, mentre il valore della deviazione standard è di poco più elevato.

Il valore medio dell'errore nella direzione della declinazione è pari a $m = 0.057$ mas mentre la sua deviazione standard è uguale a $\sigma = 0.058$ mas.

4.2.2 Grafici moto proprio

L'analisi prosegue con il relazionare i valori ottenuti dai parametri relativi al moto proprio nelle due direzioni.

I valori si addensano al centro del grafico, posto in Figura 4.15.

Data la quantità molto elevata di corpi analizzati, non si riescono a fornire delle conclusioni immediate solamente osservando il grafico, ma è necessario effettuare dei calcoli.

Il valore medio del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $m = -0.865$ mas/yr, mentre quello nella direzione della declinazione è $m = -12.64$ mas/yr.

La deviazione standard del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è pari a $\sigma = 91.44$ mas/yr, mentre quella del moto proprio nella direzione della declinazione è pari a $\sigma = 75.02$ mas/yr.

I dati di deviazione standard indicano che ci sono molti corpi aventi valori di moto proprio nelle due direzioni che si discostano molto dal valore medio. Si osserva inoltre anche il grafico relativo agli errori del moto proprio nelle due direzioni, presente in Figura 4.16.

Come è stato analizzato per il primo sottoinsieme, buona parte degli errori assume valori molto piccoli.

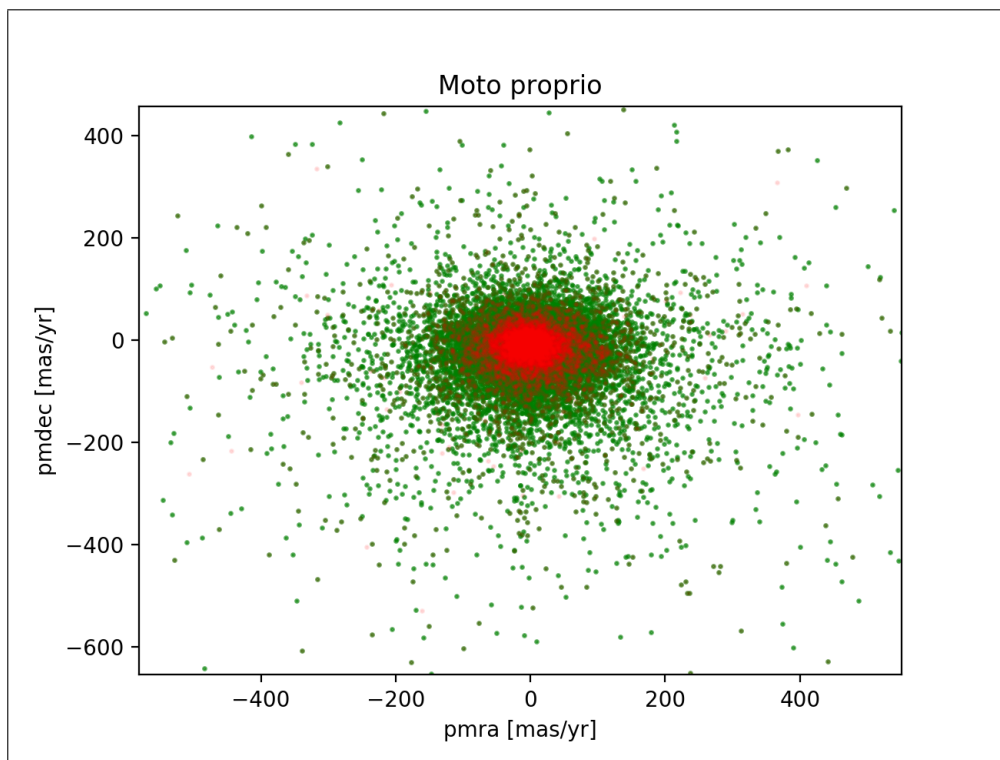


Figura 4.15: Grafico Scatter del moto proprio che relaziona i due sottoinsiemi.

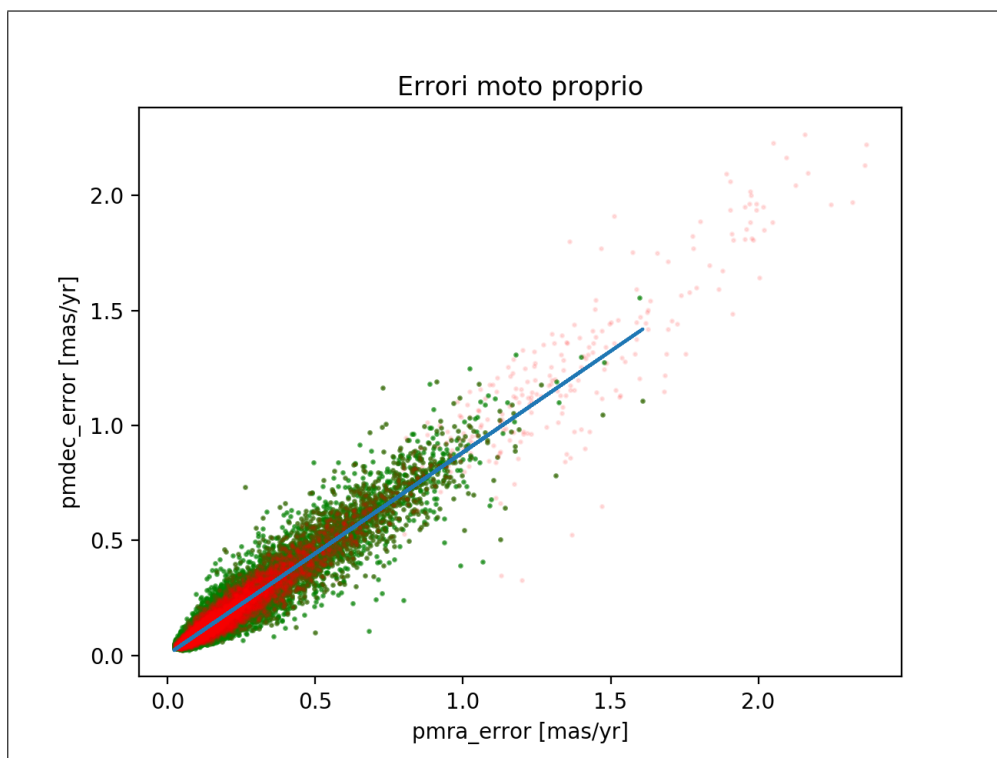


Figura 4.16: Grafico Scatter degli errori moto proprio che relaziona i due sottoinsiemi.

Il valore medio dell'errore del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è $m = 0.122$ mas/yr mentre quello nella direzione della declinazione è $m = 0.112$ mas/yr.

La deviazione standard dell'errore del moto proprio nella direzione dell'ascensione retta è pari a $\sigma = 0.126$ mas/yr, mentre quella relativo alla direzione della declinazione è pari a $\sigma = 0.116$ mas/yr.

Si può notare che, in entrambi i casi, i valori relativi alla declinazione sono minori rispetto a quelli dell'ascensione retta.

Inoltre, questi errori assumono valori piuttosto piccoli, il che significa che buona parte dei corpi non ha errori corrispondenti a valori molto elevati.

Tutto ciò ha un riscontro positivo nel lavoro effettuato da Gaia, poiché vuol dire che i dati raccolti sono molto precisi.

Anche in questo caso si può effettuare una regressione lineare che restituisce un valore di pendenza pari a $\text{slope} = 0.879$ e un valore di $\text{intercept} = 0.004$. Si può quindi affermare che la relazione fra gli errori del moto proprio nelle

due direzioni è di tipo lineare.

Si realizzano anche gli istogrammi relativi al moto proprio e agli errori del moto proprio nelle due direzioni. Anche in questi istogrammi si trova una corrispondenza dei valori medi ottenuti.

Questi grafici si possono visualizzare nelle Figure 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

In questi istogrammi si trova una corrispondenza con i valori di deviazione standard ottenuti in precedenza.

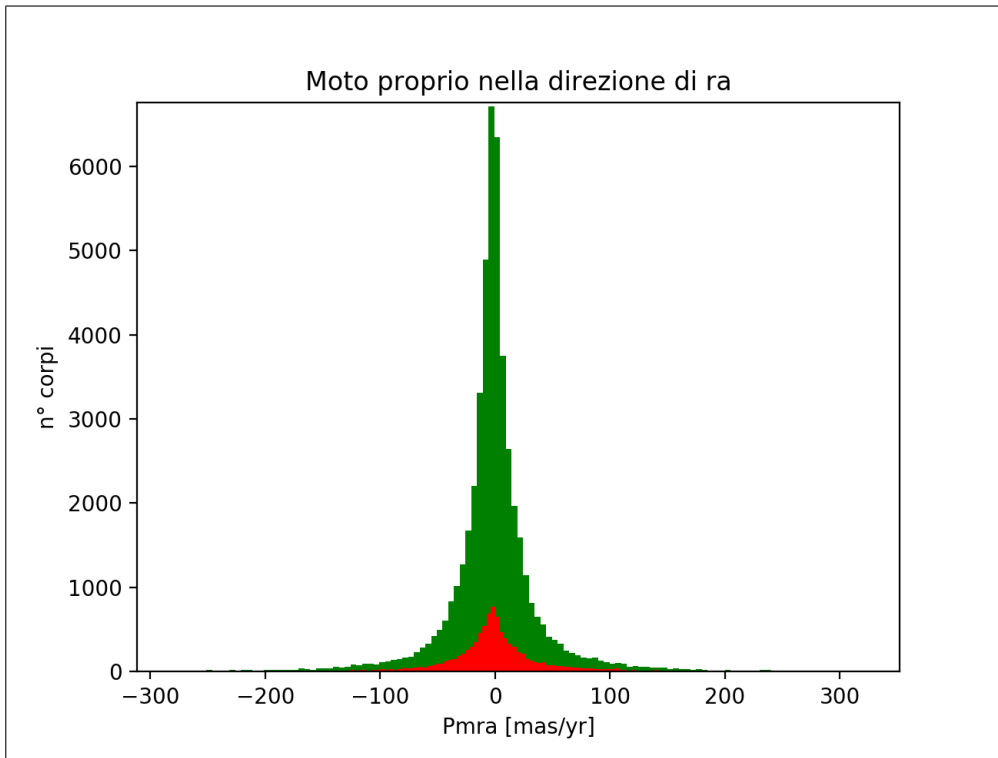


Figura 4.17: Istogramma del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione dell'ascensione retta.

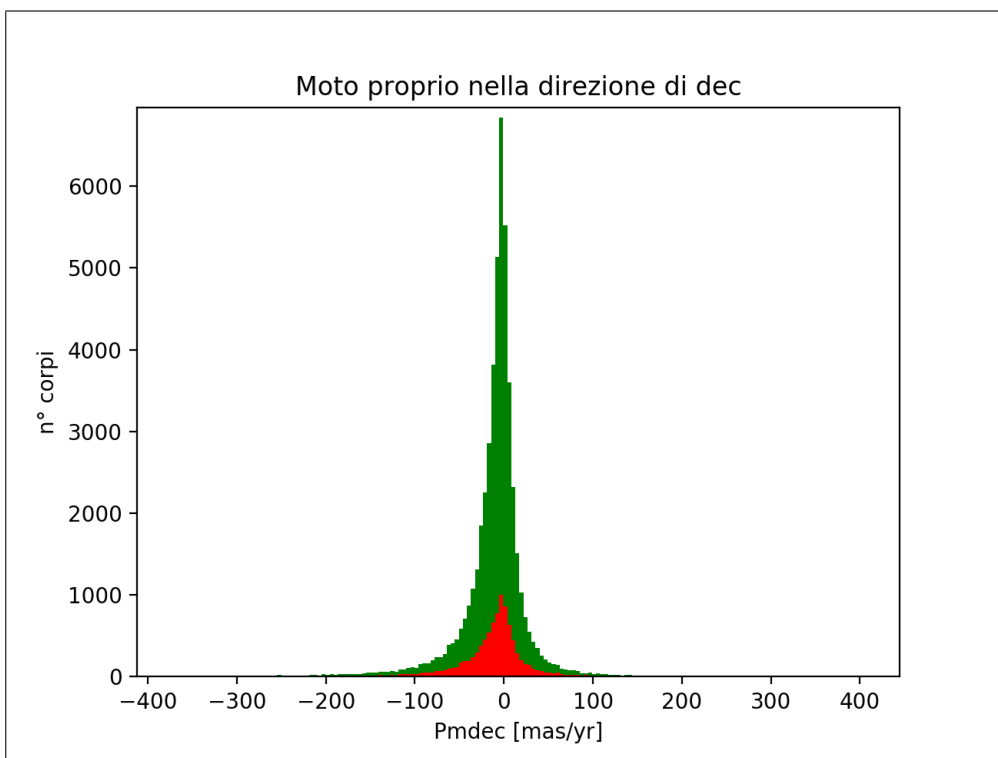


Figura 4.18: Istogramma del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione della declinazione.

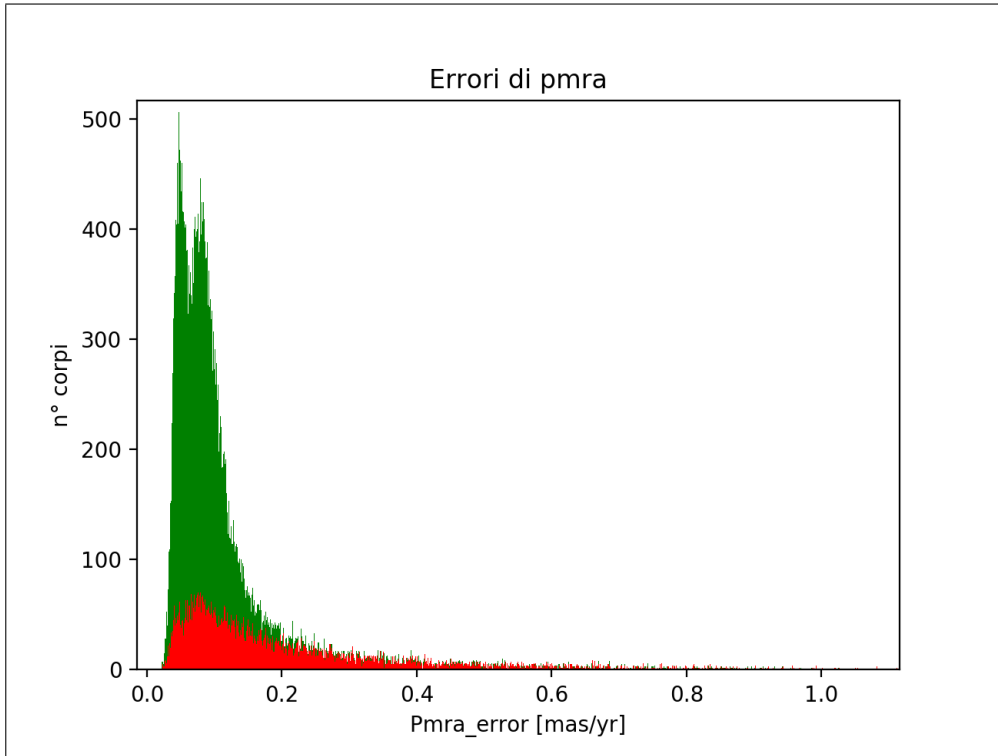


Figura 4.19: Istogramma degli errori moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione dell'ascensione retta.

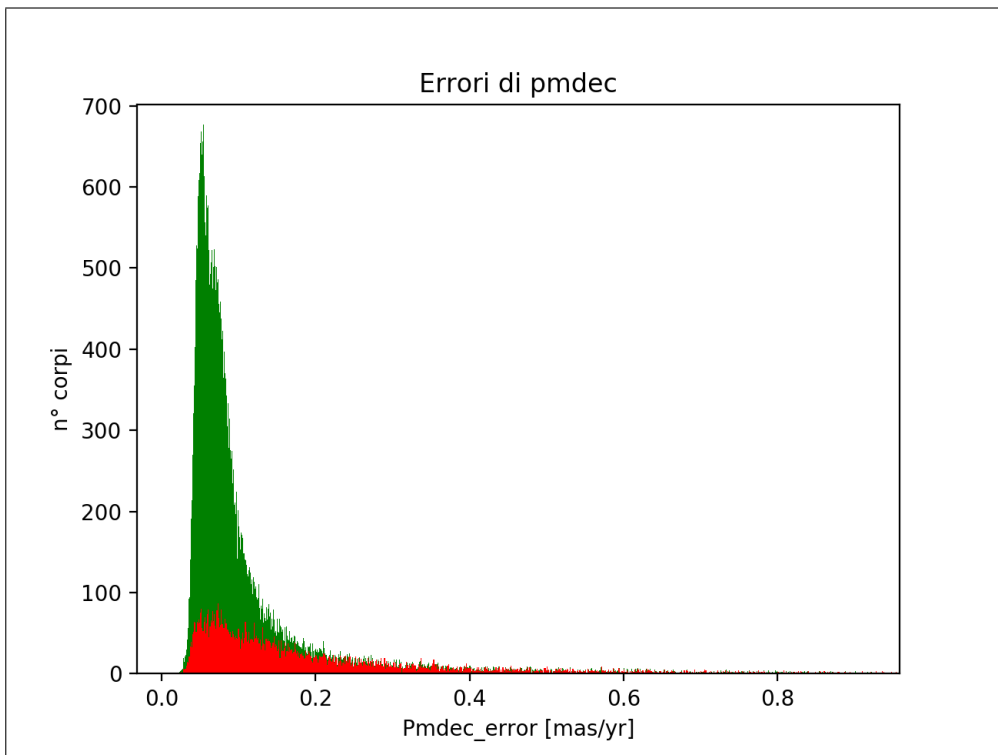


Figura 4.20: Istogramma degli errori del moto proprio dei due sottoinsiemi, nella direzione della declinazione. 61

4.2.3 Grafici parallasse

Si analizzano ora i grafici relativi alla parallasse.

Da Figura 4.21 si nota che il picco del sottoinsieme corrisponde ad un valore maggiore di 0 mas.

Il valore medio della parallasse è pari a $m = 6.86$ mas. La deviazione standard di questo secondo sottoinsieme è uguale a $\sigma = 9.85$ mas, quindi buona parte dei corpi ha un valore di parallasse che si distacca dal valore medio. Infine, si procede con l'analizzare anche gli errori di parallasse di ogni sottoinsieme, posti in Figura 4.22.

Anche qui si nota che gran parte degli errori assume valori piuttosto piccoli. Invece, il valore medio degli errori della parallasse è $m = 0.074$ mas e la deviazione standard degli errori di parallasse di questo secondo sottoinsieme è $\sigma = 0.073$ mas.

Nuovamente la deviazione standard di un parametro relativo ad un errore è inferiore a 0.1, il che significa che i dati sono raccolti con una buona precisione e accuratezza.

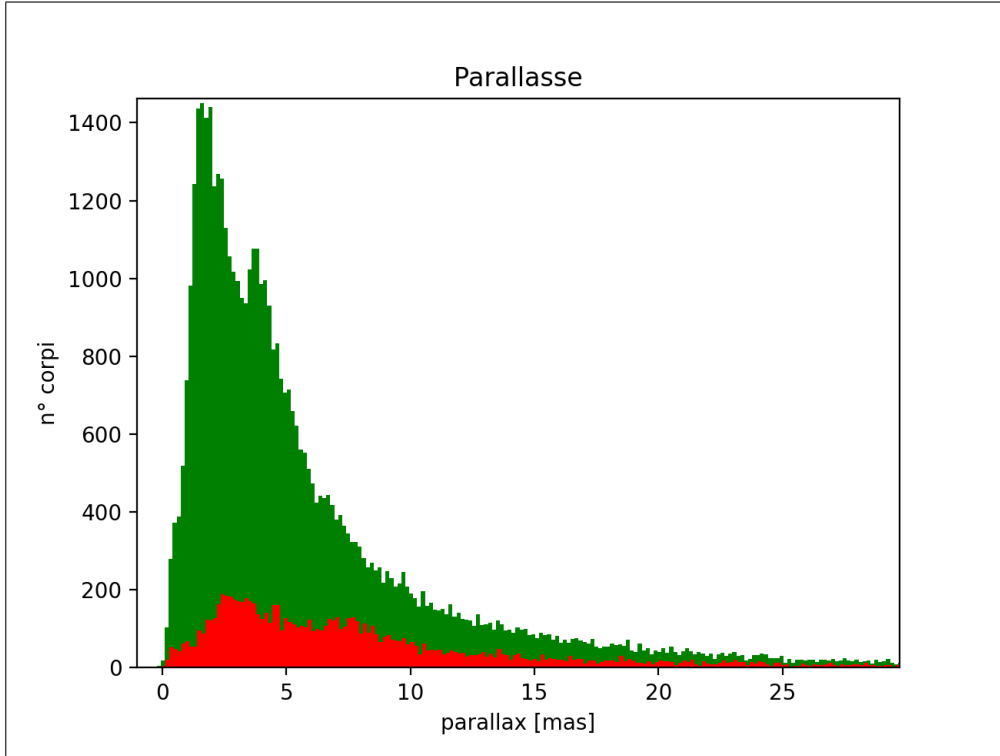


Figura 4.21: Istogramma della parallasse che relaziona i due sottoinsiemi.

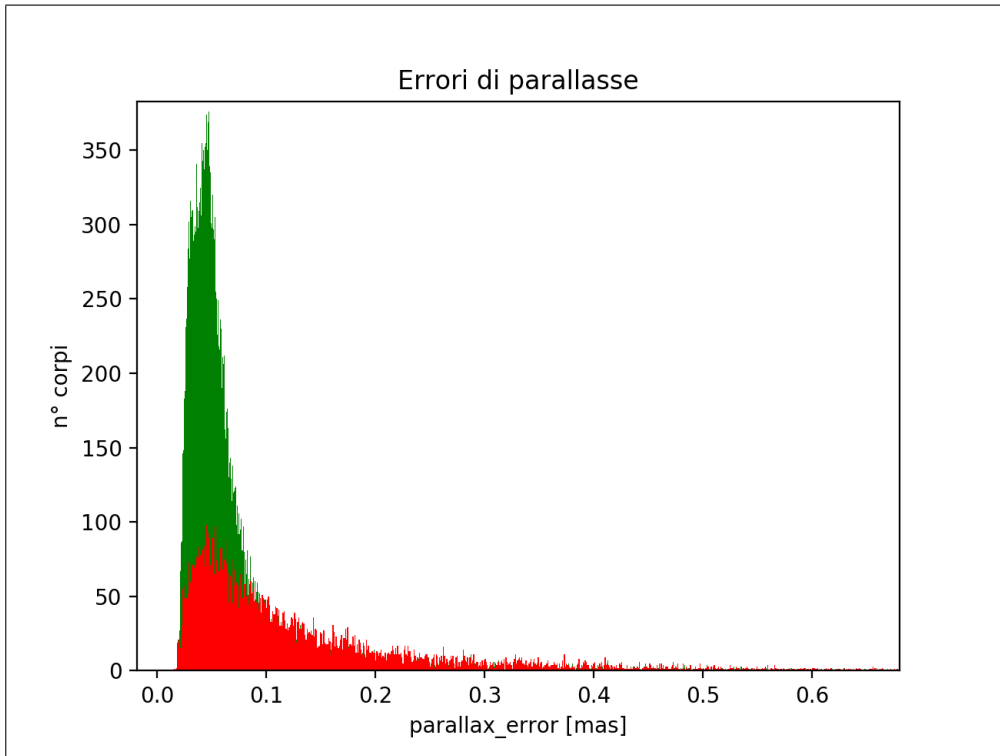


Figura 4.22: Istogramma degli errori di parallasse che relaziona i due sottoinsiemi.

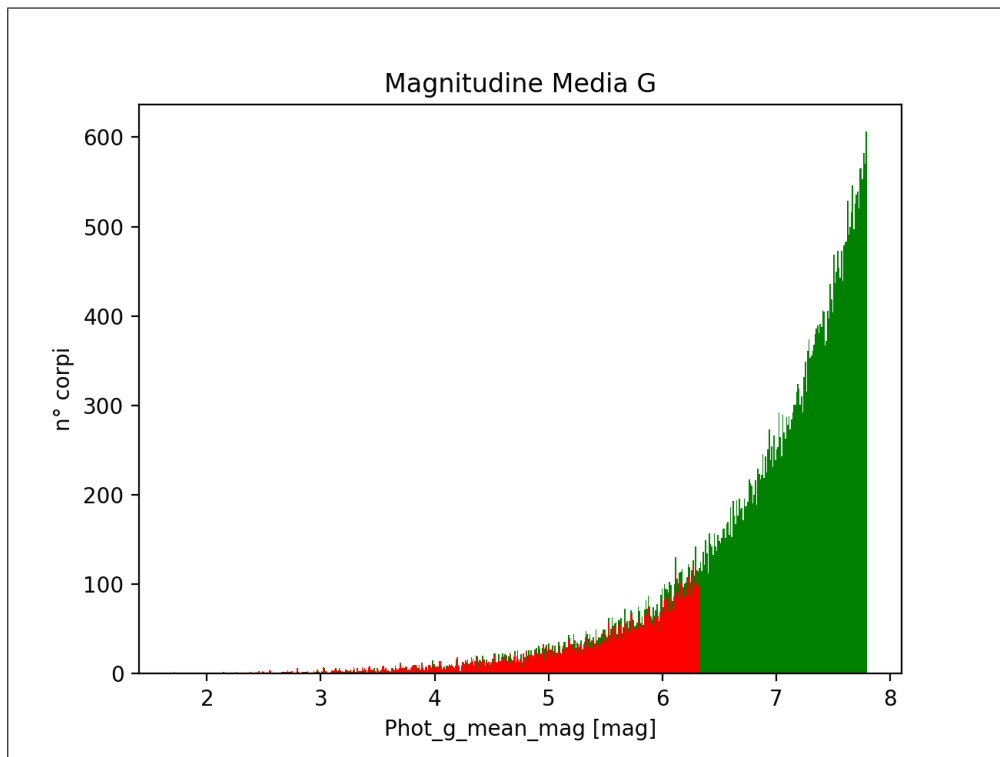


Figura 4.23: Istogramma della magnitudine G che relaziona i due sottoinsiemi.

4.2.4 Grafici magnitudine G

Per concludere, si analizzano i grafici relativi alla magnitudine G di Gaia. Analizzando la Figura 4.23 si nota che man mano che il valore di magnitudine aumenta, anche il numero dei corpi aumenta.

Nel secondo sottoinsieme inoltre il valore massimo di magnitudine è $G = 7.80$ mag, mentre nel primo sottoinsieme il valore massimo di magnitudine si trova a $G = 6.33$.

Conclusioni e sviluppi futuri

Le risorse a disposizione nell'archivio web di Gaia, rendono possibili innumerevoli ricerche nelle quali si possono analizzare diversi tipi di parametri e richiedere specifiche condizioni.

L'esistenza, inoltre, di un linguaggio di scrittura tramite *query*, combinato con il linguaggio di programmazione Python, permette un'analisi dettagliata del catalogo di Gaia attraverso l'implementazione di vari grafici.

I risultati ottenuti dai due sottoinsiemi più numerosi trovano una corrispondenza reciproca l'uno con l'altro.

Buona parte dei corpi analizzati, infatti, dispone di parametri che assumono all'incirca gli stessi valori.

Inoltre, il lavoro compiuto dal satellite Gaia si può considerare eccellente, con la presenza di qualche randomica eccezione (corrispondente a errori analizzati) che non va a compromettere il lavoro nel suo insieme.

Come passo successivo si può proseguire nello studio dei metodi di ricerca, cercando di implementare *queries* più elaborate e dettagliate. E, in più, si può procedere col confrontare non solo sottoinsiemi di corpi celesti provenienti dallo stesso catalogo, ma anche provenienti da cataloghi differenti.

Infine, un ulteriore passo sarà la realizzazione di grafici più elaborati e l'analisi attraverso essi anche di più parametri comparati tra di loro.

Bibliografia

- [1] F. Remor, *Relazione Finale di Tirocinio*, 2019
- [2] European Space Agency, *Gaia Data Release 2*, 9 Luglio 2018
- [3] Lindegren, *Gaia Data Release 2: the astrometric solution*, 2018
- [4] Gaia Collaboration, *The Celestial reference frame (Gaia-CRF2)*, 25 Aprile 2018
- [5] IVOA, *IVOA Astronomical Data Query Language*, 30 Ottobre 2008
- [6] European Space Agency (ESA), *The Billion Star Surveyor Gaia Data Release 2*, 2018
- [7] <http://sci.esa.int/gaia/>
- [8] www.cosmos.esa.int/
- [9] <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- [10] <https://www.gaia.ac.uk/data/gaia-data-release-1/adql-cookbook>
- [11] www.wikipedia.com

Ringraziamenti

In primis, ringrazio ogni professore incontrato in questi tre anni di percorso universitario, per avermi trasmesso la passione e la dedizione verso questi studi. Un ringraziamento particolare va al professor Tortora ed al dottor Zannoni, rispettivamente mio relatore e correlatore, per il tempo e l'impegno speso e dedicato in questi ultimi mesi.

Inoltre, vorrei ringraziare la mia famiglia, i miei genitori Gianluca e Sabrina, e i miei fratelli Chiara e Samuele, che mi hanno appoggiata e aiutata in questo percorso, tra liti e risate, senza mai smettere di credere in me.

Un ringraziamento particolare anche ai miei nonni che mi sono sempre stati vicini.

Ringrazio anche tutti gli amici che mi hanno supportata e aiutata in questo percorso, in particolare le mie compagne di università, conosciute durante questi tre anni, Pâmela, Serena e Sofia, con cui ho condiviso momenti di gioia ma anche momenti di difficoltà. Nonostante tutto siamo sempre state l'una al fianco dell'altra e ci siamo aiutate in ogni istante possibile.

Un ringraziamento particolare anche alle mie compagne di squadra, in particolare a Giulia, per essermi sempre stata accanto e avermi sempre ascoltata, e a Martina, per avermi sopportata e sostenuta soprattutto in questo ultimo periodo.