



# *Analisi e caratterizzazione di curve di luce di bolidi rilevati con la rete PRISMA*

*Sessione estiva 2019, 19/07/2019 Torino, TO*

*Relatore: Mario Edoardo Bertaina  
Correlatore: Daniele Gardiol*

*Marco Lacedra*

# SOMMARIO

- **Meteore e meteoriti**
- **Fireball Network e PRISMA**
- **Strumentazione e infrastrutture**
- **Calibrazione**
- **Analisi di curve di luce**
  - I. Determinazione curva di luce
  - II. Triangolazione e calcolo magnitudine assoluta
  - III. Smoothing della curva
- **Risultati**
  - I. Parametri utilizzati per l'analisi
  - II. Esempio: 16/01/2018
  - III. Distribuzione parametri
  - IV. Relazioni fra parametri
- **Attività didattiche**

# METEORE E METEORITI

AMERICAN METEOR SOCIETY, [WWW.AMSMETEORS.ORG](http://WWW.AMSMETEORS.ORG)



## ASTEROIDE

Piccolo corpo celeste composto da roccia, metalli e ghiaccio in orbita attorno al Sole.

*Da un metro a parecchie centinaia di chilometri.*

## COMETA

Corpo solido composto da ghiaccio, roccia, polveri e gas. Nel processo di fratturazione e sgretolamento alcune comete lasciano dietro sé una traccia luminosa di gas e frammenti solidi chiamata coda.

*Nucleo (parte solida): decine di chilometri,*

*Coda: milioni di chilometri*

## METEOIROIDE

Piccolo asteroide.

*Da qualche millesimo di millimetro a un metro.*



## SCIAME METEORICO

Evento periodico annuale provocato dal passaggio della Terra attraverso una regione ricca di particelle come quelle lasciate dietro di sé dalle comete. Vengono generate numerose meteore che sembrano originare tutte dallo stesso punto nel cielo, detto radiante.

## METEORA

Fenomeno luminoso causato dall'ingresso in atmosfera di un meteoroido. Le meteore di bassa intensità luminosa vengono comunemente chiamate "stelle cadenti".



**BOLIDE**  
Meteora molto brillante, più  
luminoso del pianeta Venere.

**SUPERBOLIDE**  
Luce emessa da un meteoroide o un asteroide  
quando esplode in atmosfera, diventando più  
brillante della Luna piena. Gli oggetti più  
grandi possono esplodere anche a pochi  
chilometri dalla superficie terrestre.

**METEORITE**  
Porzione di meteoroide o asteroide che è sopravvissuta  
al passaggio nell'atmosfera e che ha toccato il suolo.  
*Da pochi grammi a decine di tonnellate.*

Concept: Mike Hankey - Design: Vincent Perlerin for AMS - 2018 © AMS  
Traduzione: Daniele Gardiol for PRISMA



# FIREBALL NETWORK E PRISMA

## FIREBALL NETWORK:

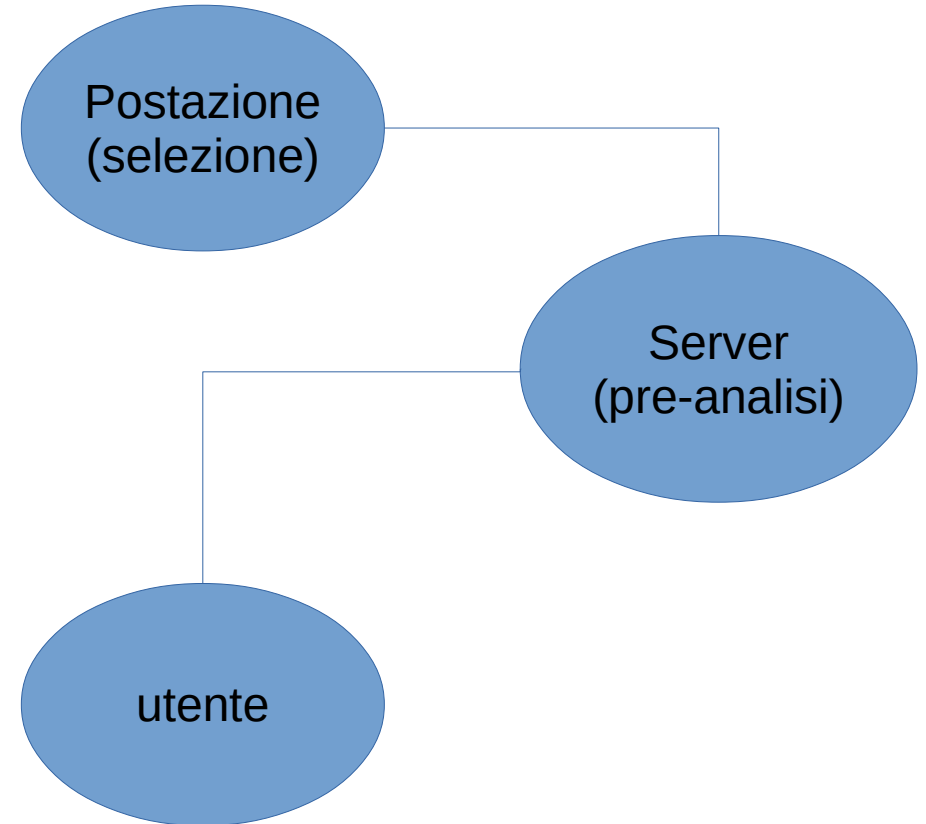
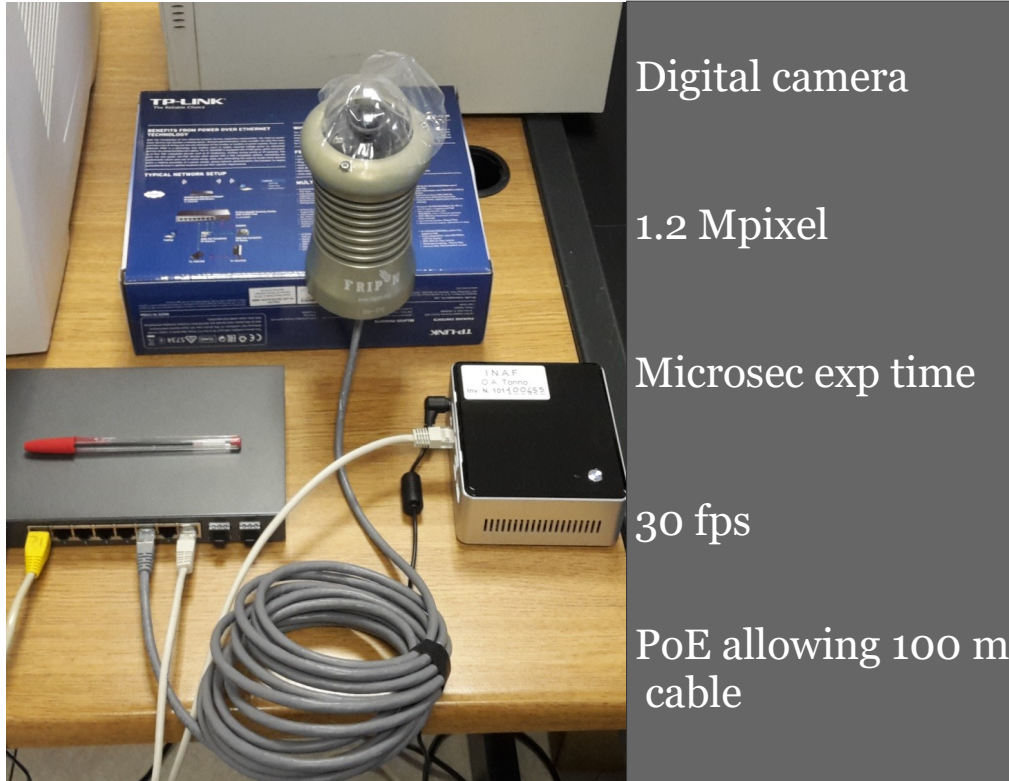
- rete dedicata all'osservazione di bolidi
- osservazione sistematica e simultanea di bolidi e meteore

## Progetto PRISMA :

- prima rete italiana di camere all-sky
- osservazione sistematica di meteore brillanti
- determinare le orbite degli oggetti e delimitare le aree dell'eventuale caduta



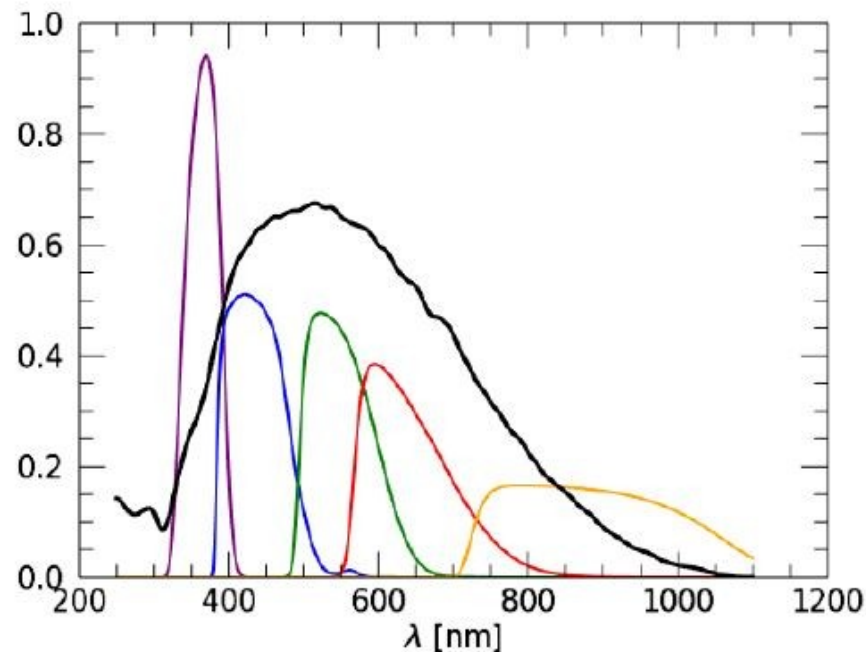
# STRUMENTAZIONE E INFRASTRUTTURA



# CALIBRAZIONE

- Calibrazione del flusso (fotometria) utilizzando come candela standard Vega
- Calibrazione spaziale (astrometria) attraverso stelle di posizione nota

Efficienza camere PRISMA



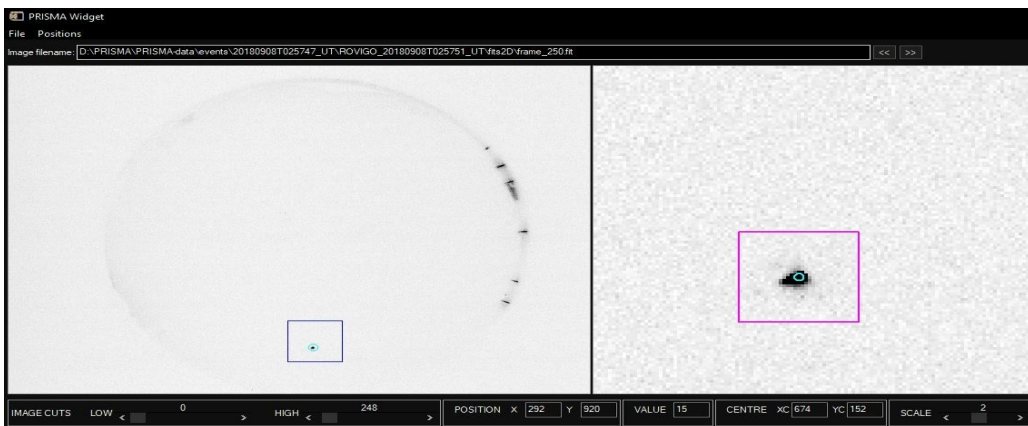
# ANALISI DI CURVE DI LUCE

- Determinazione della curva di magnitudine apparente dalle immagini
- Triangolazione del bolide e calcolo magnitudine assoluta
- Calcolo dei parametri significativi



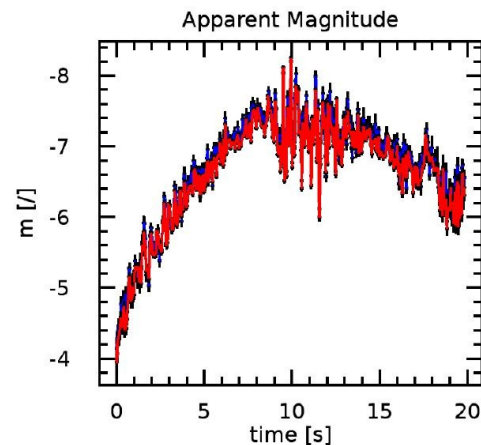
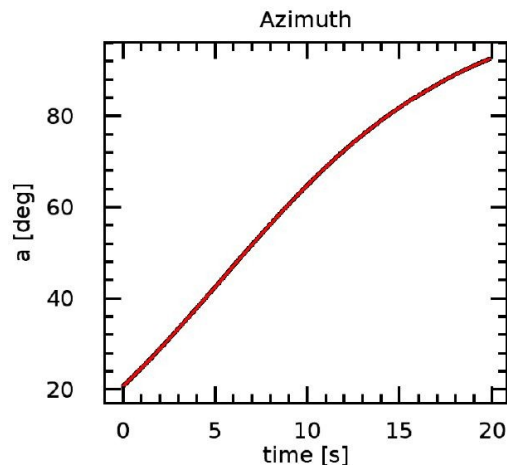
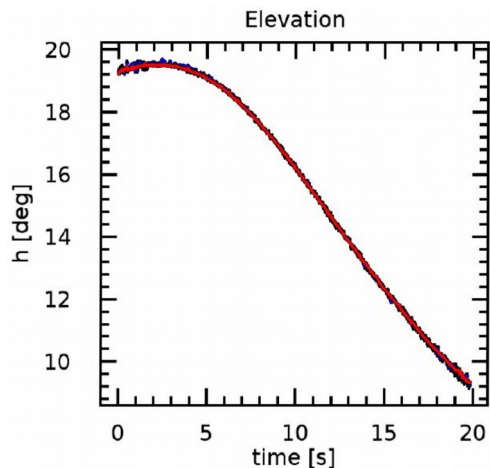


# DETERMINAZIONE CURVA DI LUCE



Tramite un software apposito si segue il percorso del bolide tracciando in ogni immagine la posizione del centro di massa

Vengono calcolate per ogni camera le coordinate angolari e la magnitudine per ogni immagine

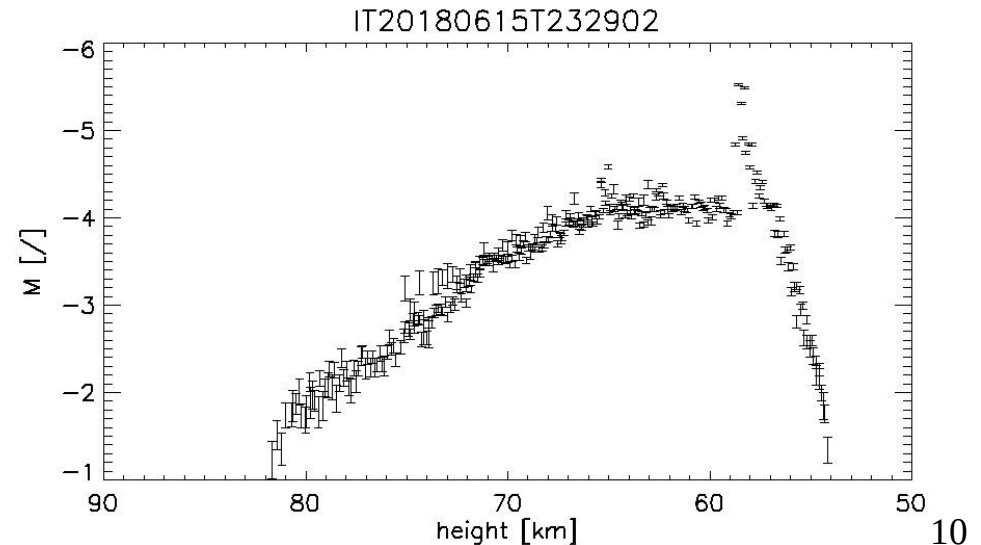
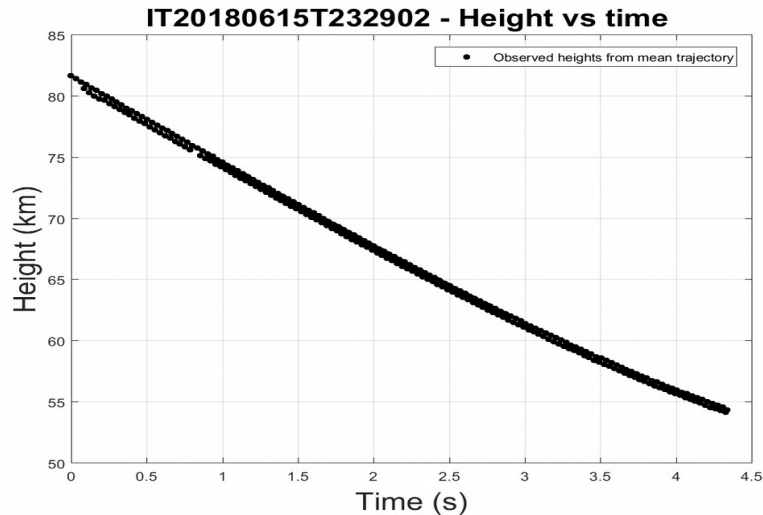


# TRIANGOLAZIONE E MAGNITUDINE ASSOLUTA

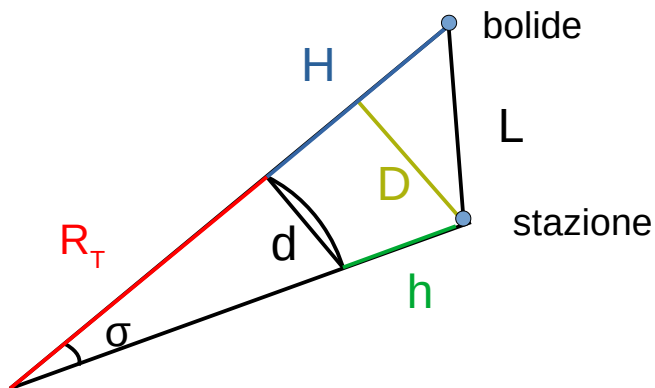
Viene quindi calcolata l'altezza del bolide da terra per ogni istante

Nota l'altezza da terra si ricava la distanza del bolide per ogni camera (L) e si calcola la magnitudine assoluta tramite la seguente formula:

$$M = m - 5 \log\left(\frac{L}{100 \text{ km}}\right)$$



# CALCOLO DELLA DISTANZA L



- H : quota bolide
- h : quota stazione
- $R_T$ : raggio terrestre
- L : distanza bolide-stazione

$$D = d \frac{R_T + h}{R_T}$$

$$L^2 = D^2 + (H - h)^2$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \text{archav}(\text{hav}(\Delta\phi) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \text{hav}(\Delta\lambda)) \\ &= 2 \arcsin \sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)} \end{aligned}$$

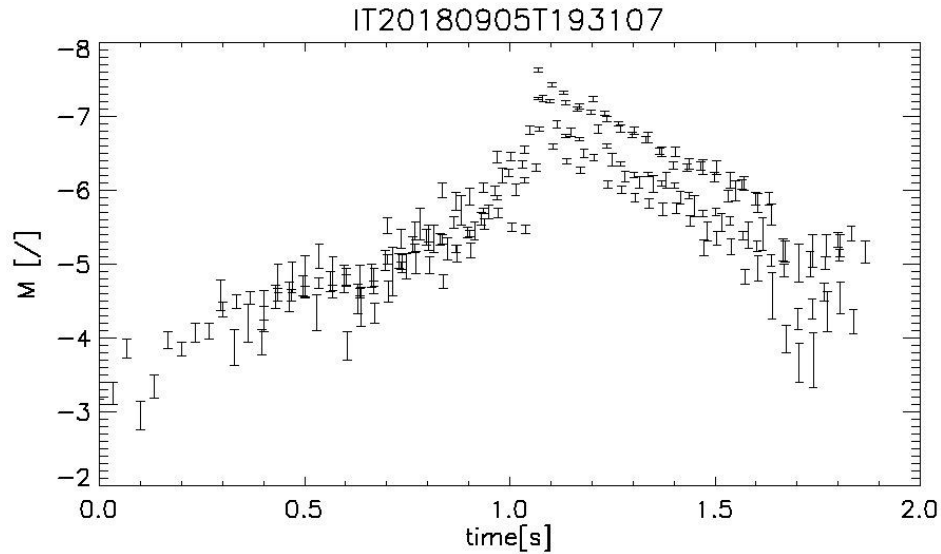
- $\sigma$ : angolo compreso fra i due punti
- $\Delta\phi$ : delta latitudine
- $\Delta\lambda$ : delta longitudine
- $\text{hav}(\theta) = \sin^2(\theta/2)$

# SMOOTHING DELLA CURVA

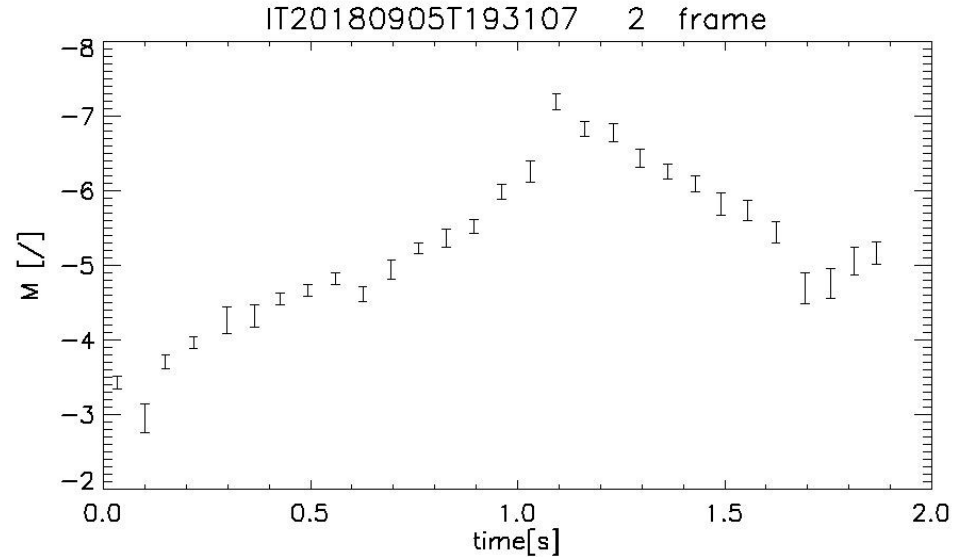
Si è sezionata la curva di magnitudine assoluta in intervalli di 2 frames (0,066 s) mediando tempi e magnitudini per ogni intervallo

Si sono analizzati 53 eventi compresi fra il 01/06/2018 e il 30/09/2018

Curva “raw”



Curva “smooth”



# PARAMETRI UTILIZZATI PER L'ANALISI

- Indice di asimmetria (skewness)  $f$  [I]  $\gamma = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] \longrightarrow f = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2\right]^{3/2}}$
- Indice di curtosi (kurtosis)  $p$  [I]  $\kappa = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^4\right] \longrightarrow p = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2\right]^2} - 3$
- Durata dell'evento (duration)  $D$  [s]
- Magnitudine massima (max mag)  $MM$  [I]
- Massimo flare misurato (jumps)  $J$  [I]

Per calcolare i jumps si è sottratto lo smooth da 3 frame allo smooth da 1 frame e si è presa la massima differenza per ogni curva

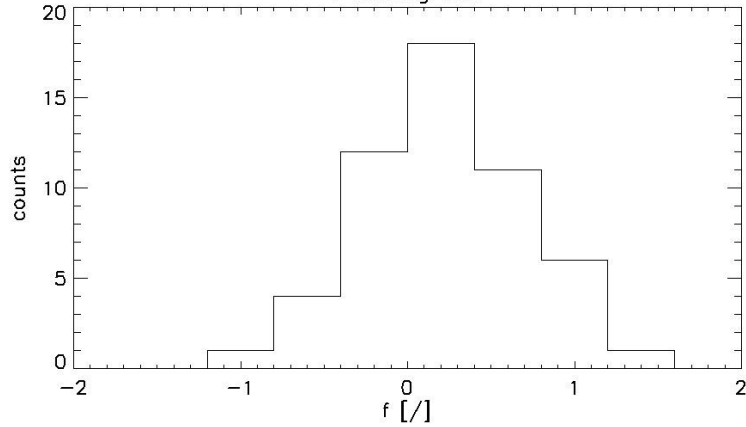
Durante l'analisi si è fatto riferimento all' articolo di N. Brosch et al. (2004)

*Brosch, N., et al. (2004). "Meteor light curves: the relevant parameters". In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 355.1, pp. 111-119'*

# RISULTATI: DISTRIBUZIONE PARAMETRI

## ASIMMETRIA

f histogram



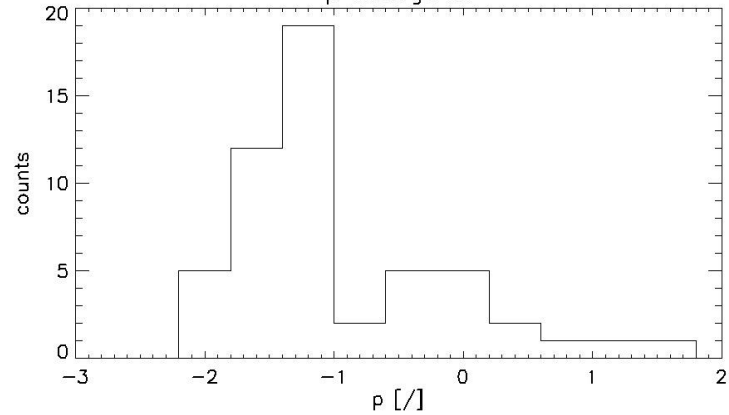
$$\bar{f} = 0,45$$

$$\sigma = 0,47$$

Le curve di luce risultano avere il picco di luminosità spostato verso destra, ovvero le meteore mostrano maggiore intensità luminosa verso la fine della curva

## CURTOSI

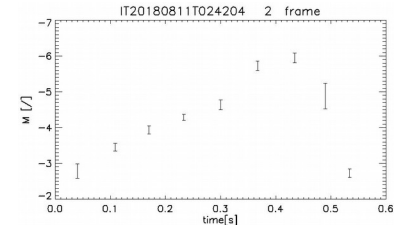
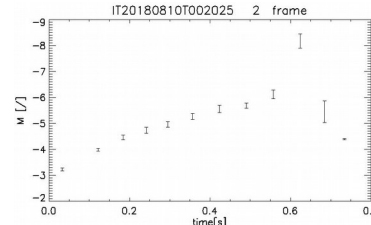
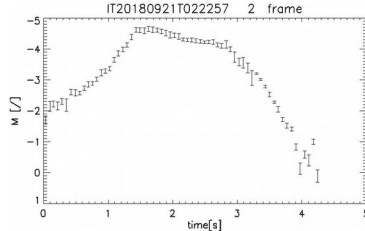
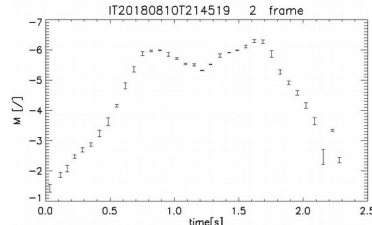
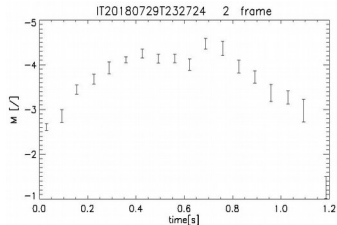
p histogram



$$\bar{p} = -0,78$$

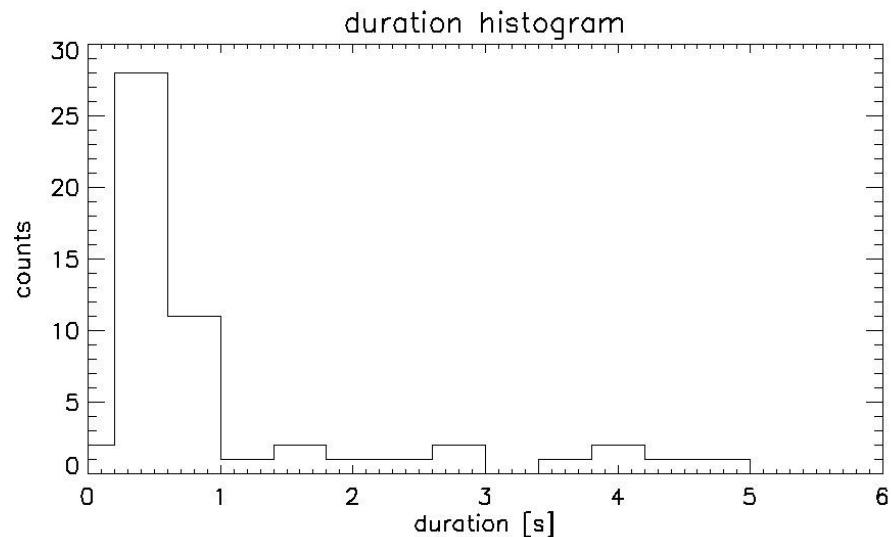
$$\sigma = 0,83$$

Le curve di luce risultano essere per la maggior parte platicurtiche, ovvero più “piatte” di una distribuzione gaussiana



# RISULTATI: DISTRIBUZIONE PARAMETRI

durata

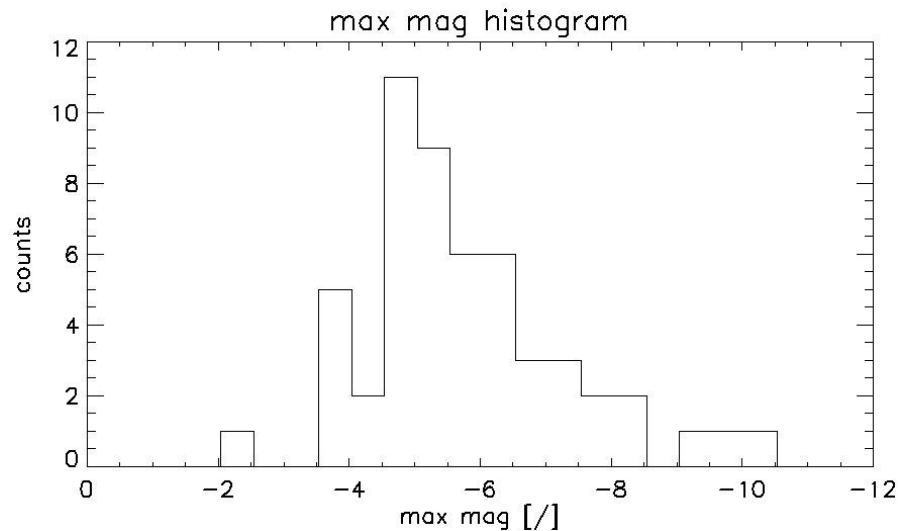


$$\bar{D} = 1,24 \text{ s}$$

$$\sigma = 1,20 \text{ s}$$

La maggior parte delle meteore osservate ha durata inferiore al secondo

Magnitudine massima



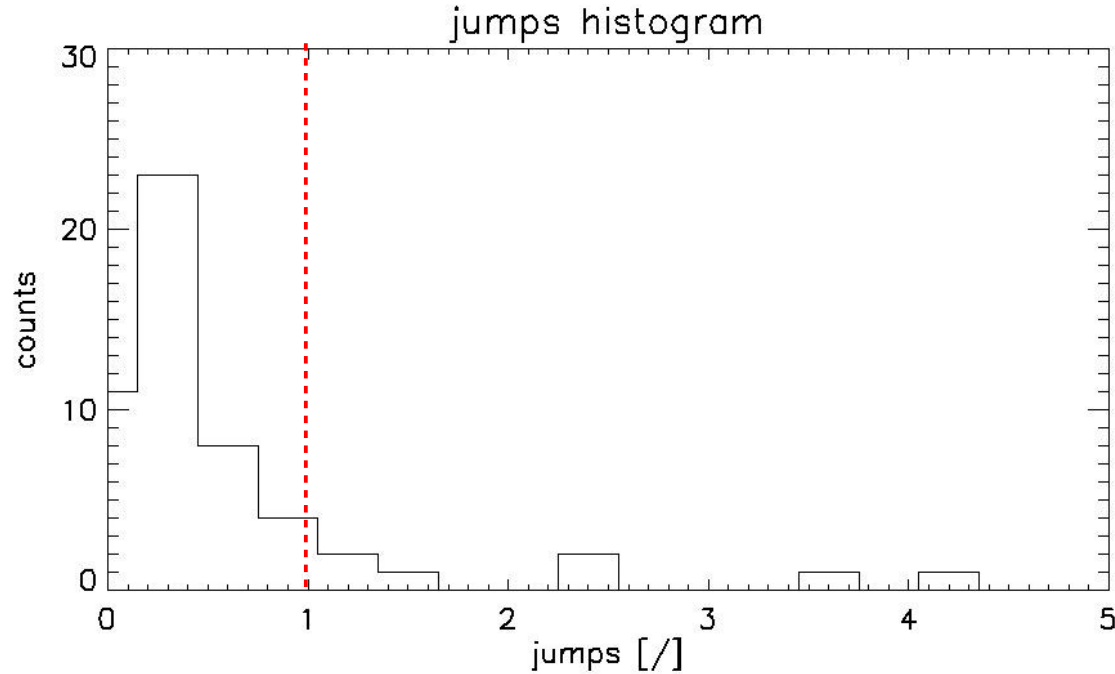
$$\overline{MM} = -5,58$$

$$\sigma = 1,60$$

Si nota che la coda sinistra della distribuzione è assente: questo è causato dai limiti strumentali delle camere utilizzate e dal criterio di selezione degli eventi

# RISULTATI: DISTRIBUZIONE PARAMETRI

## Distribuzione del flare massimo



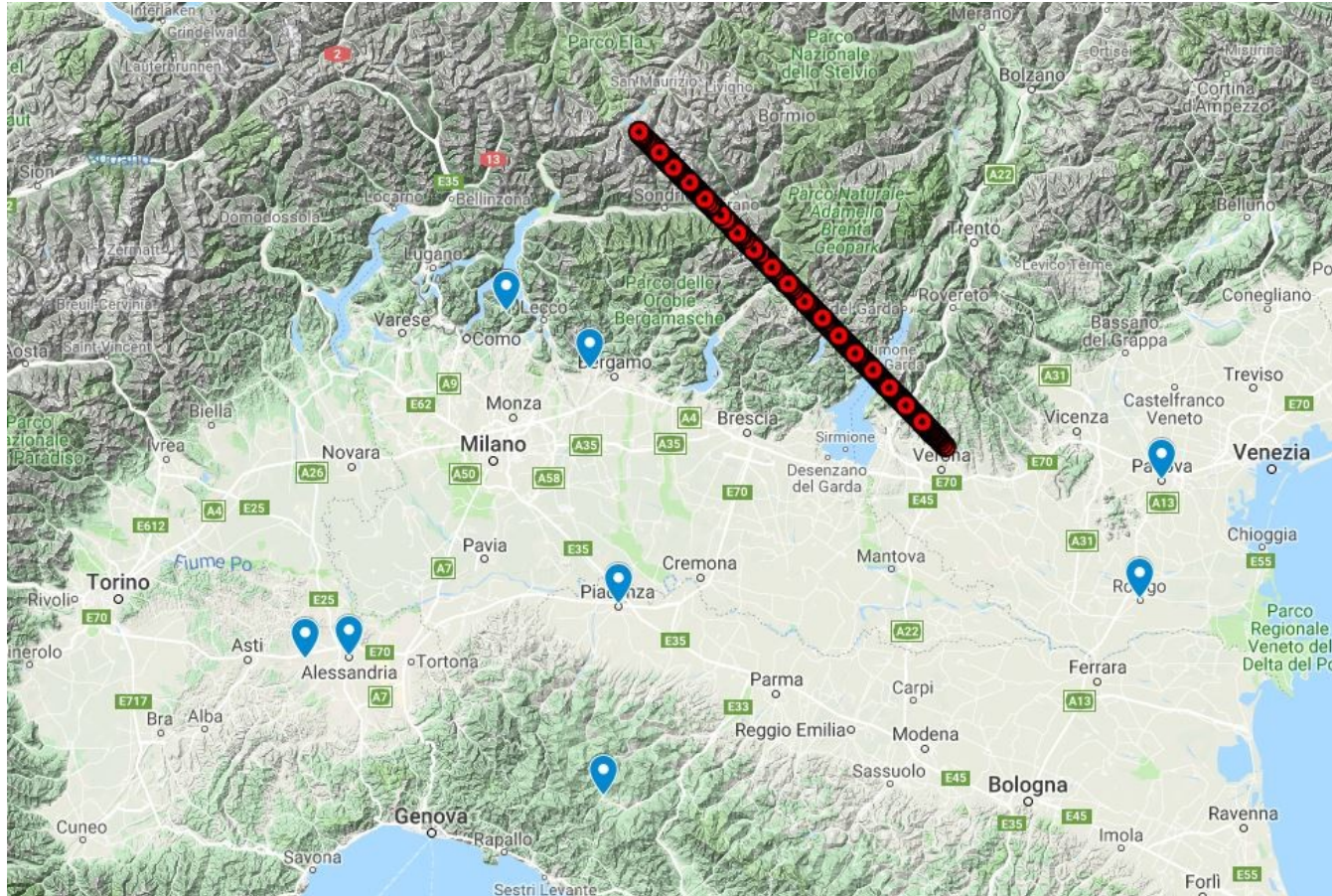
$$\bar{J} = 0,72$$

$$\sigma = 0,78$$

La maggior parte dei jumps è inferiore a 1 magnitudine; per piccoli valori i jumps sono poco significativi in quanto potrebbero essere causati da fluttuazioni statistiche e non dai flares



# Evento del 01/06/2018

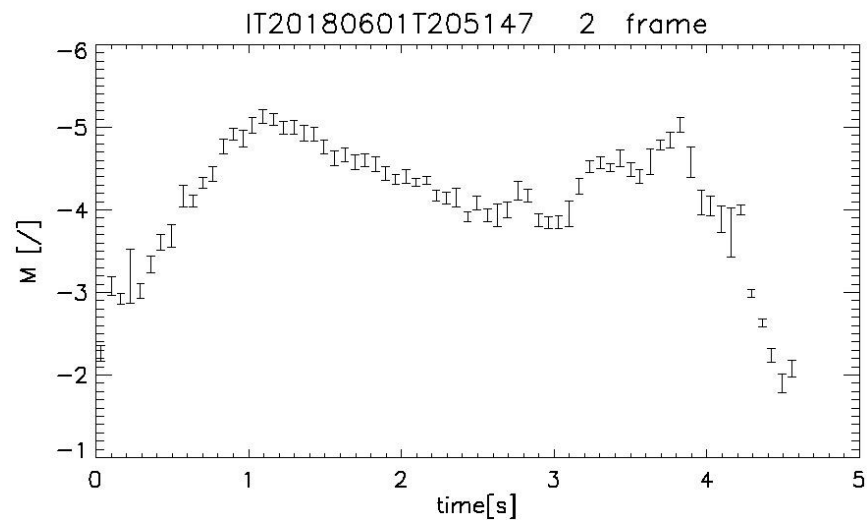
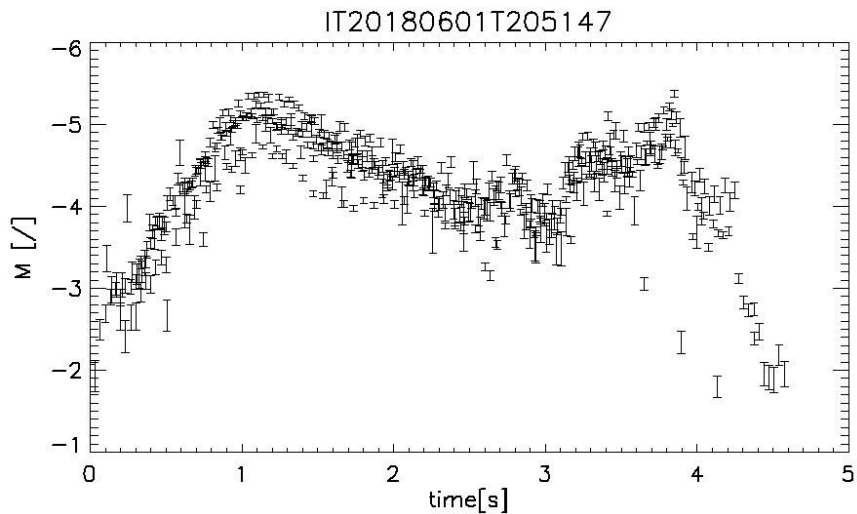


# Evento del 01/06/2018



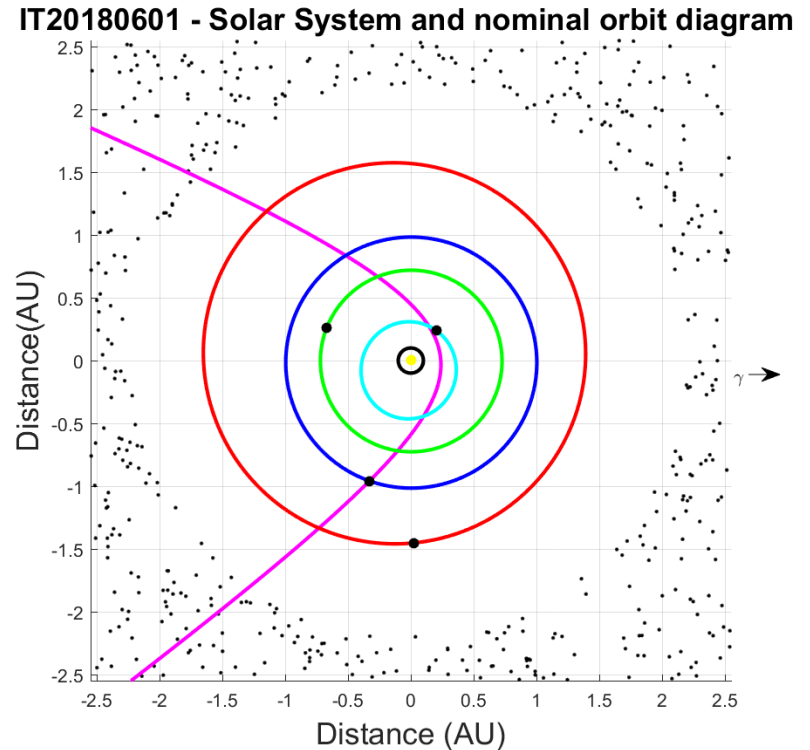
## Valori parametri

- $f = 1,2 \pm 0,3$
- $p = 0,9 \pm 0,6$
- $D = 4,52 \text{ s}$
- $MM = -5,13 \pm 0,09$
- $J = 0,33 \pm 0,15$

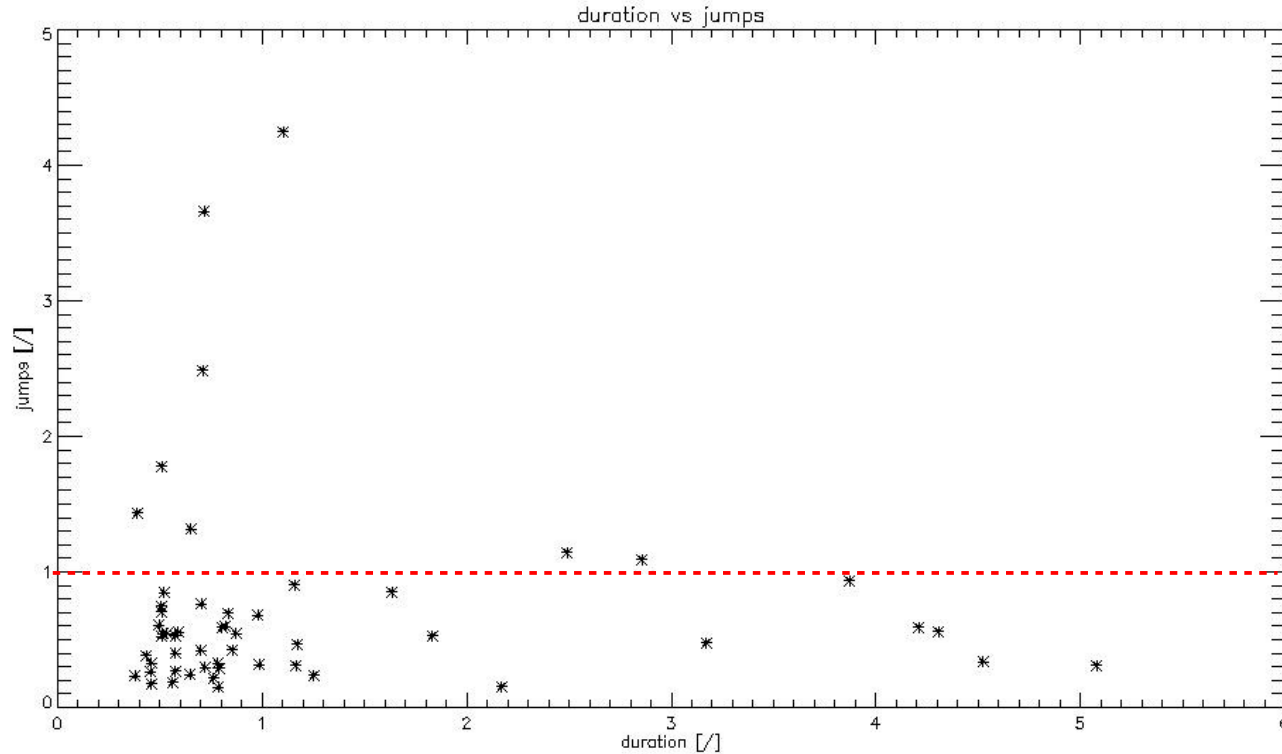


# Evento del 01/06/2018

- Velocità media = 31 km/s
- Massa = 13 g
- Diametro = 22 mm
  
- Orbita eliocentrica iperbolica giacente sull'eclittica
- Angolo di entrata =  $11^\circ$



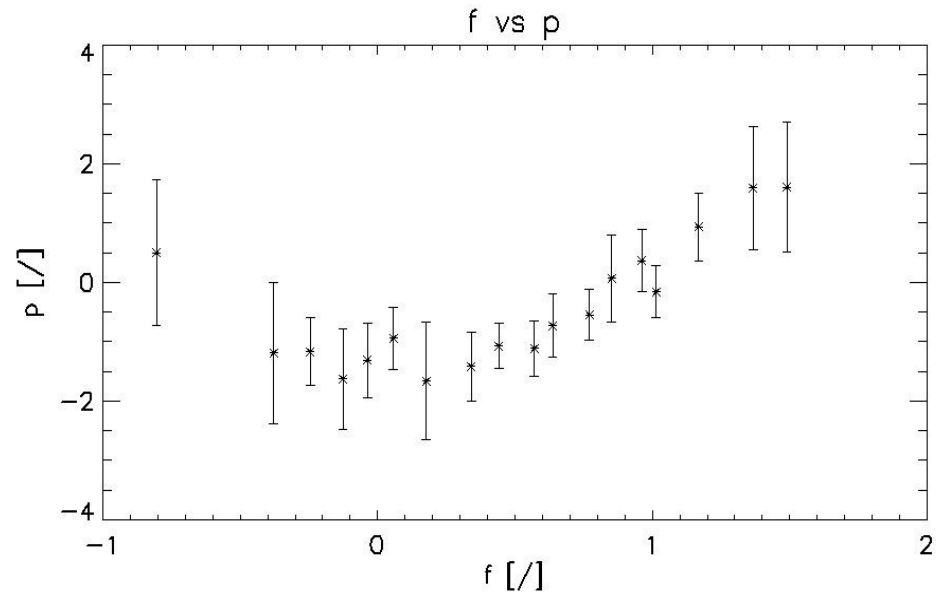
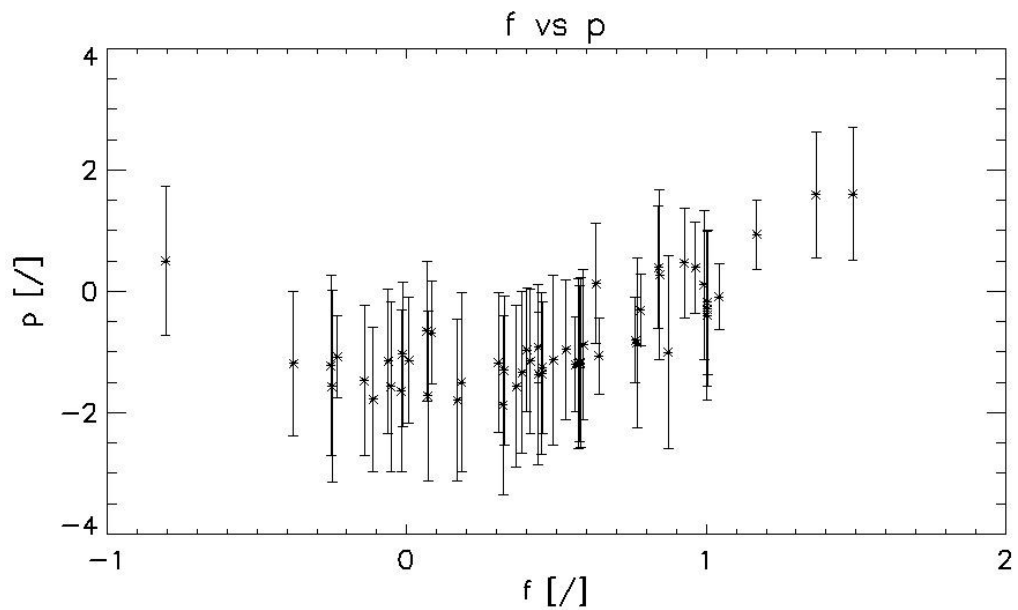
# RELAZIONI FRA PARAMETRI



Brosch et al. (2004) evidenzia come le meteore di breve di durata mostrino i flares di maggiore intensità: questa relazione è stata trovata anche nel nostro set di dati

# RELAZIONI FRA PARAMETRI

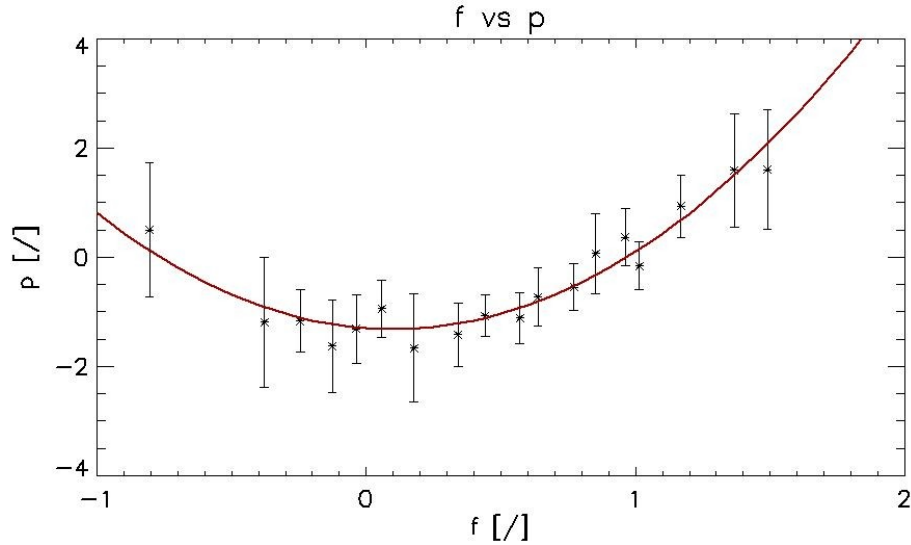
F vs P



Si nota un andamento parabolico: per visualizzarlo meglio si è effettuata una procedura analoga a quanto fatto per le curve di luce

# RELAZIONI FRA PARAMETRI

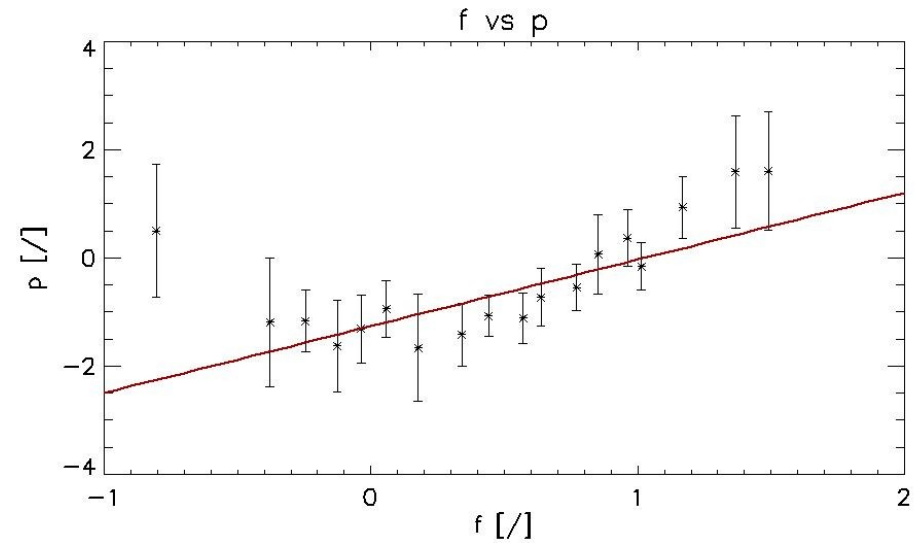
## FIT PARABOLICO



$$\chi^2_1 = 6,67$$
$$\chi^2_c = 25,00$$

$$\text{gradi libert\`a} = 15$$
$$\alpha = 5\%$$

## FIT LINEARE



$$\chi^2_2 = 18,43$$
$$\chi^2_c = 26,30$$

$$\text{gradi libert\`a} = 16$$
$$\alpha = 5\%$$

Test di Fisher:  $F = \frac{\chi^2_2/\nu_2}{\chi^2_1/\nu_1}$   $F = 2,76$

$$F_c = 2,40$$

$$\alpha = 5\%$$

# RELAZIONI FRA PARAMETRI

	Correlazione lineare	Attendibilità (N=50)
f / p	0,63	>99,95%
D / f	0,29	92%
MM / f	0,43	99,6%
D / p	0,32	96,6%
MM / p	0,28	92%
D / MM	-0,20	84%

# ATTIVITA' DIDATTICHE





***GRAZIE PER L'ATTENZIONE!***

Si ringrazia per la collaborazione:  
Dario Barghini  
Albino Carbognani





# ERRORI F E P

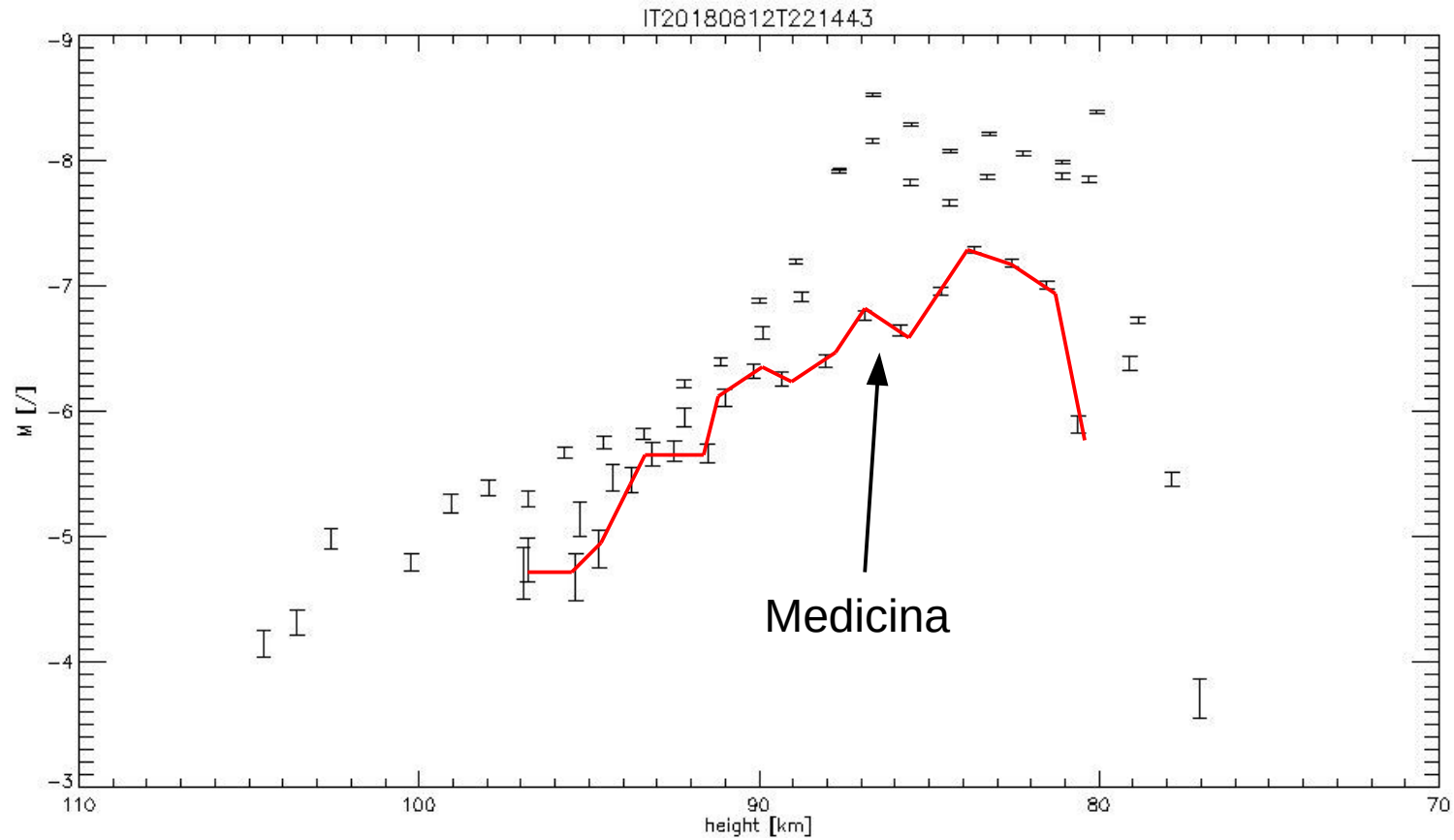
$$\sigma_f = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+3)(n+1)}}$$

$$\sigma_p = 2\sigma_f \sqrt{\frac{n^2-1}{(n-3)(n+5)}}$$

# Evento del 12/08/18



# Evento del 12/08/18

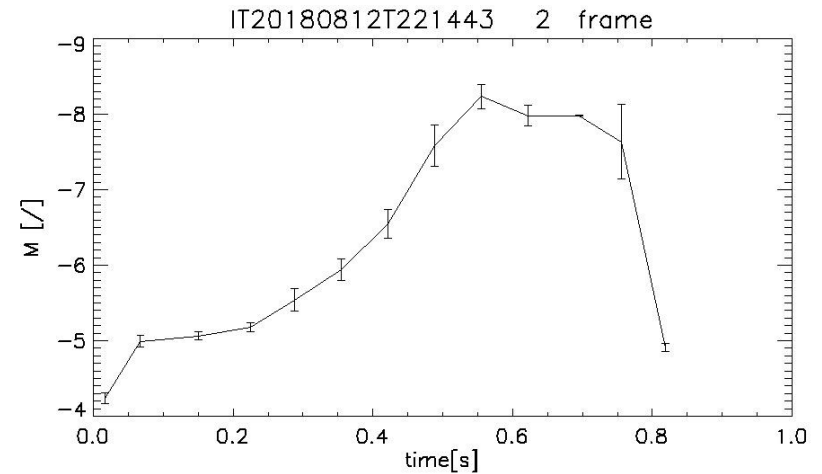
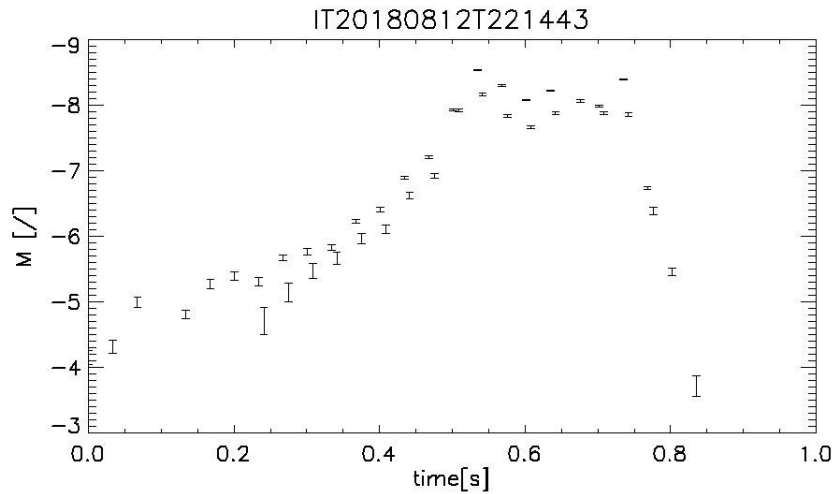


# Evento del 12/08/18



## Valori parametri

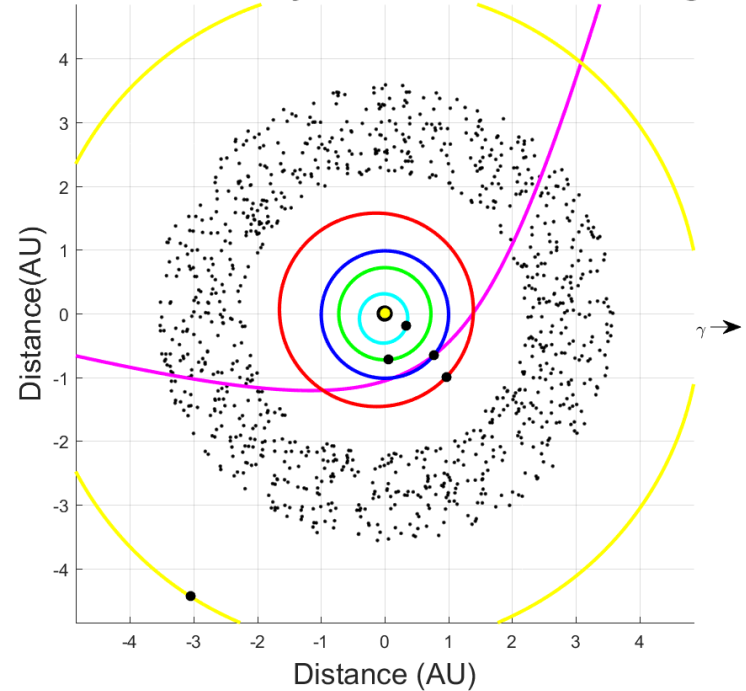
- $f = -0,1 \pm 0,6$
- $p = 1,8 \pm 1,2$
- $D = 0,80 \text{ s}$
- $MM = -8,24 \pm 0,16$
- $J = 0,59 \pm 0,16$



# Evento del 12/08/18

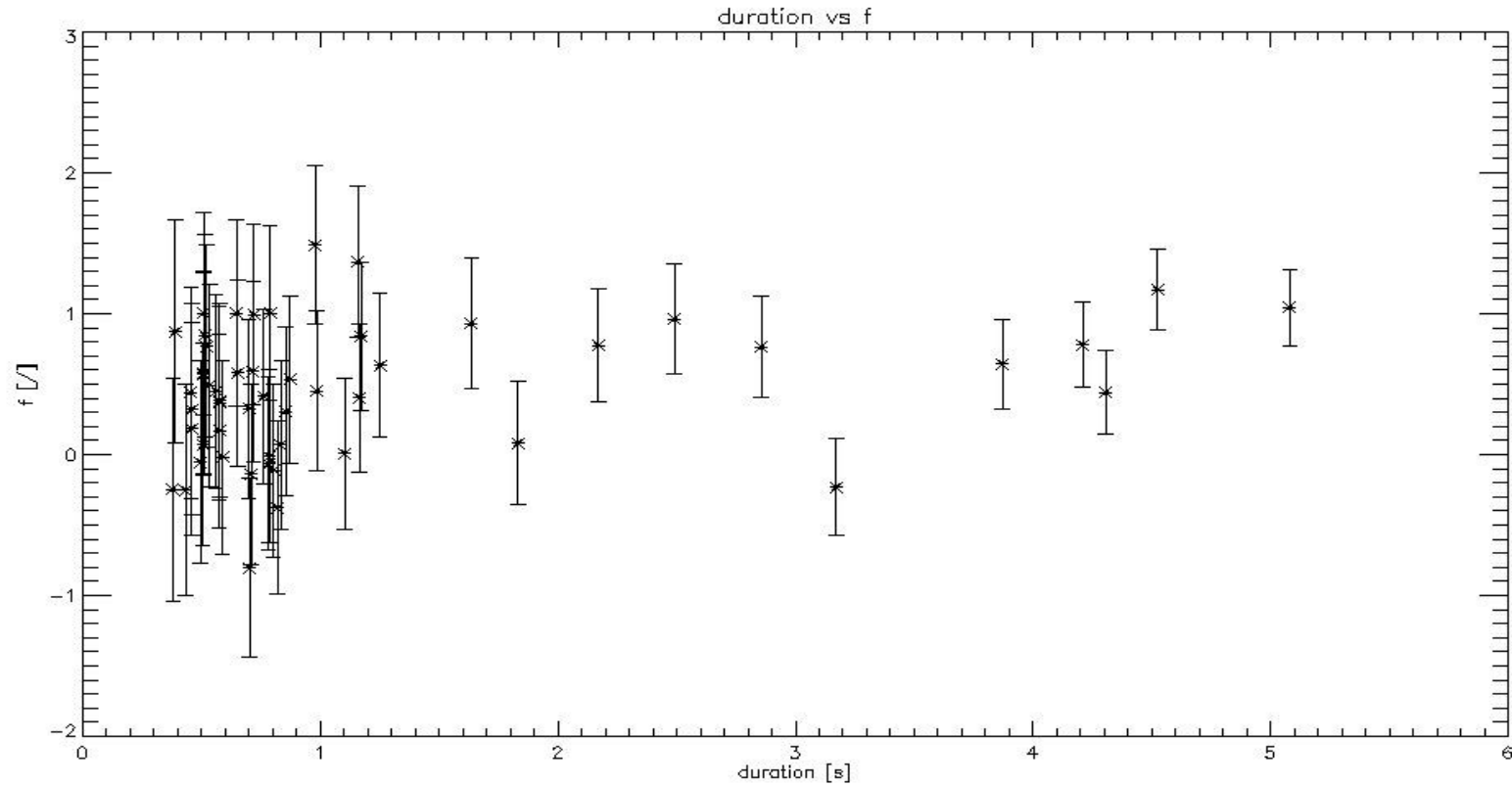
- Velocità media = 59 km/s
- Massa = 1g
- Diametro = 8 mm
  
- Orbita eliocentrica iperbolica
- Angolo di entrata =  $34^\circ$

IT20180812 - Solar System and nominal orbit diagram

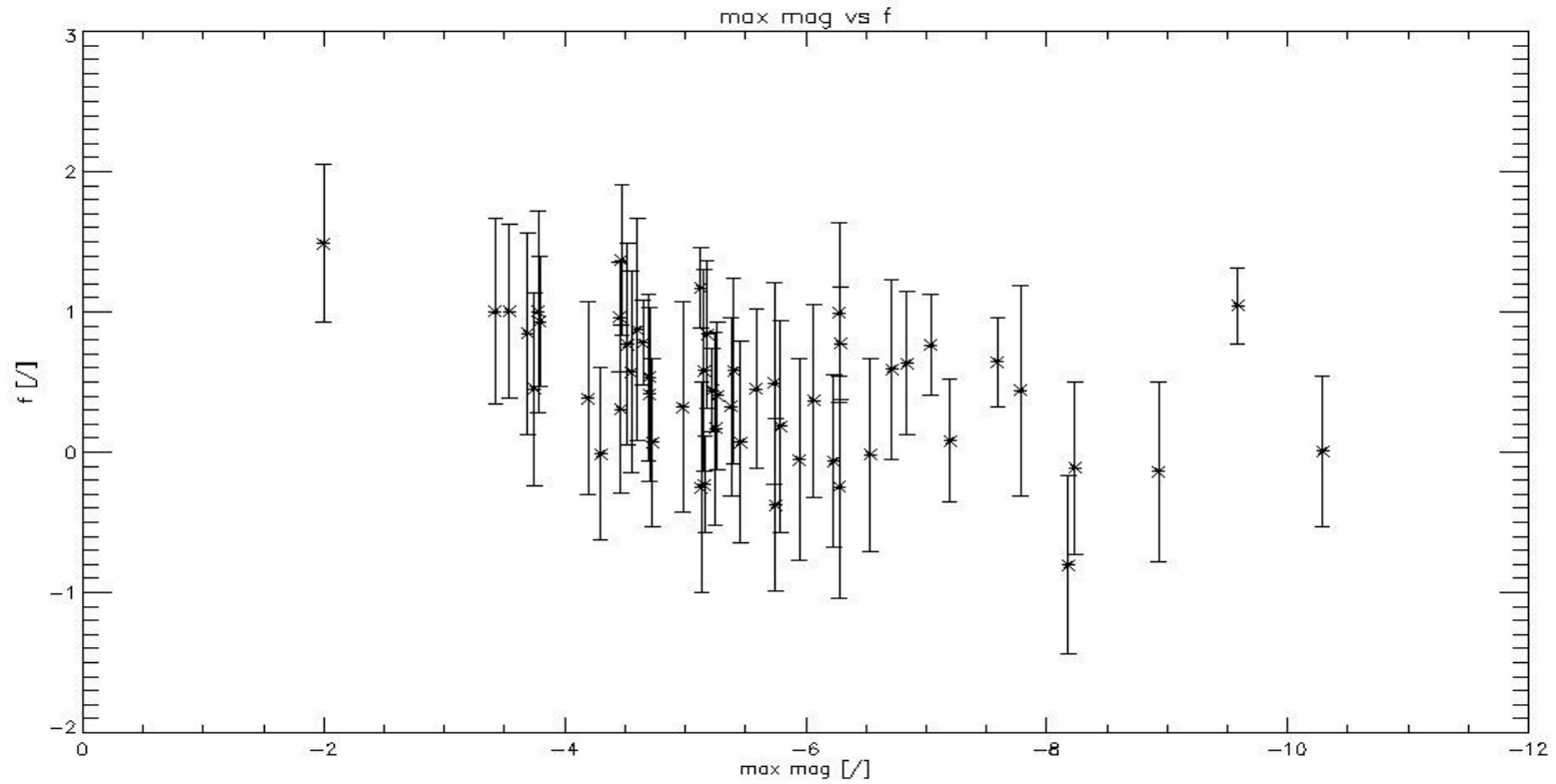




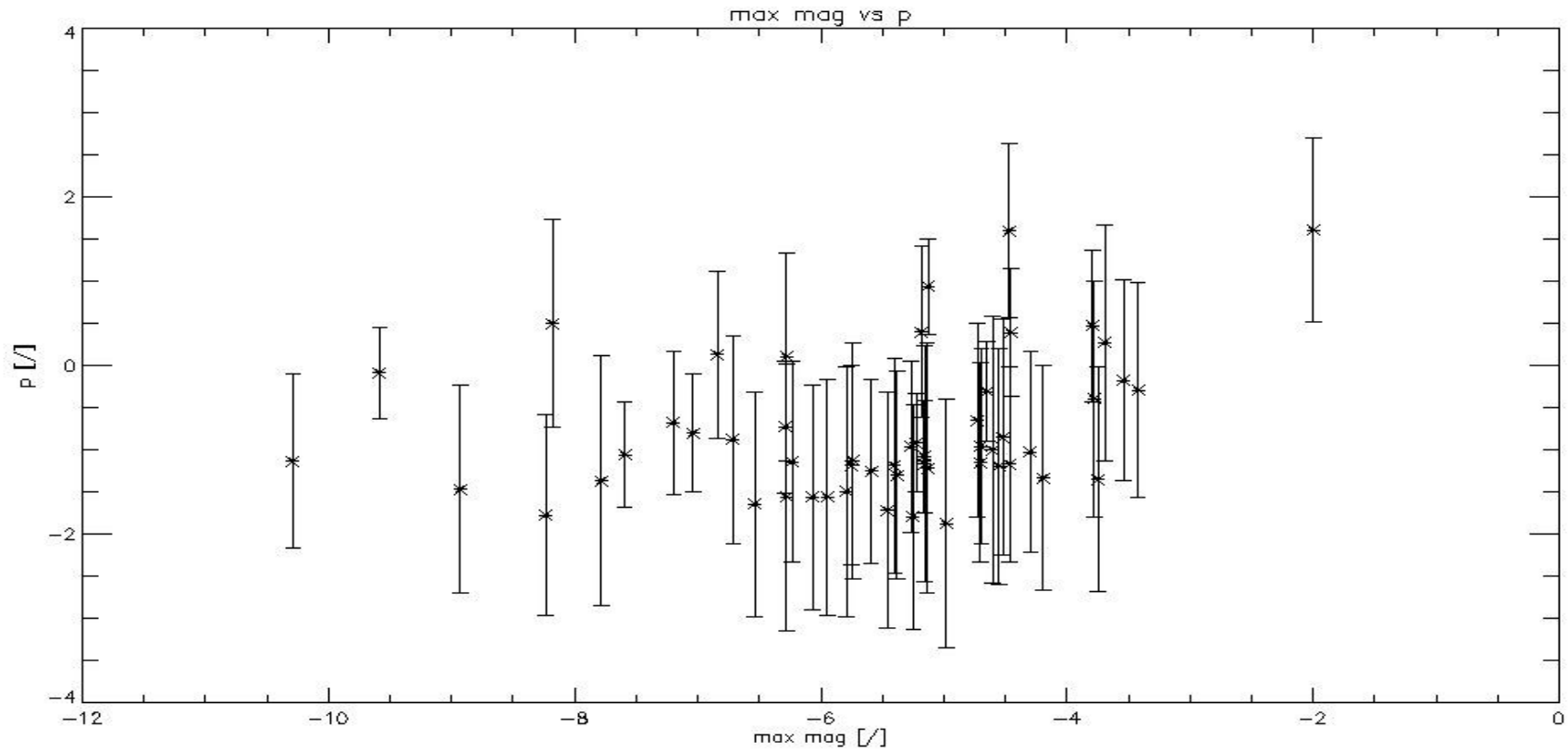
# GRAFICO DURATA VS F



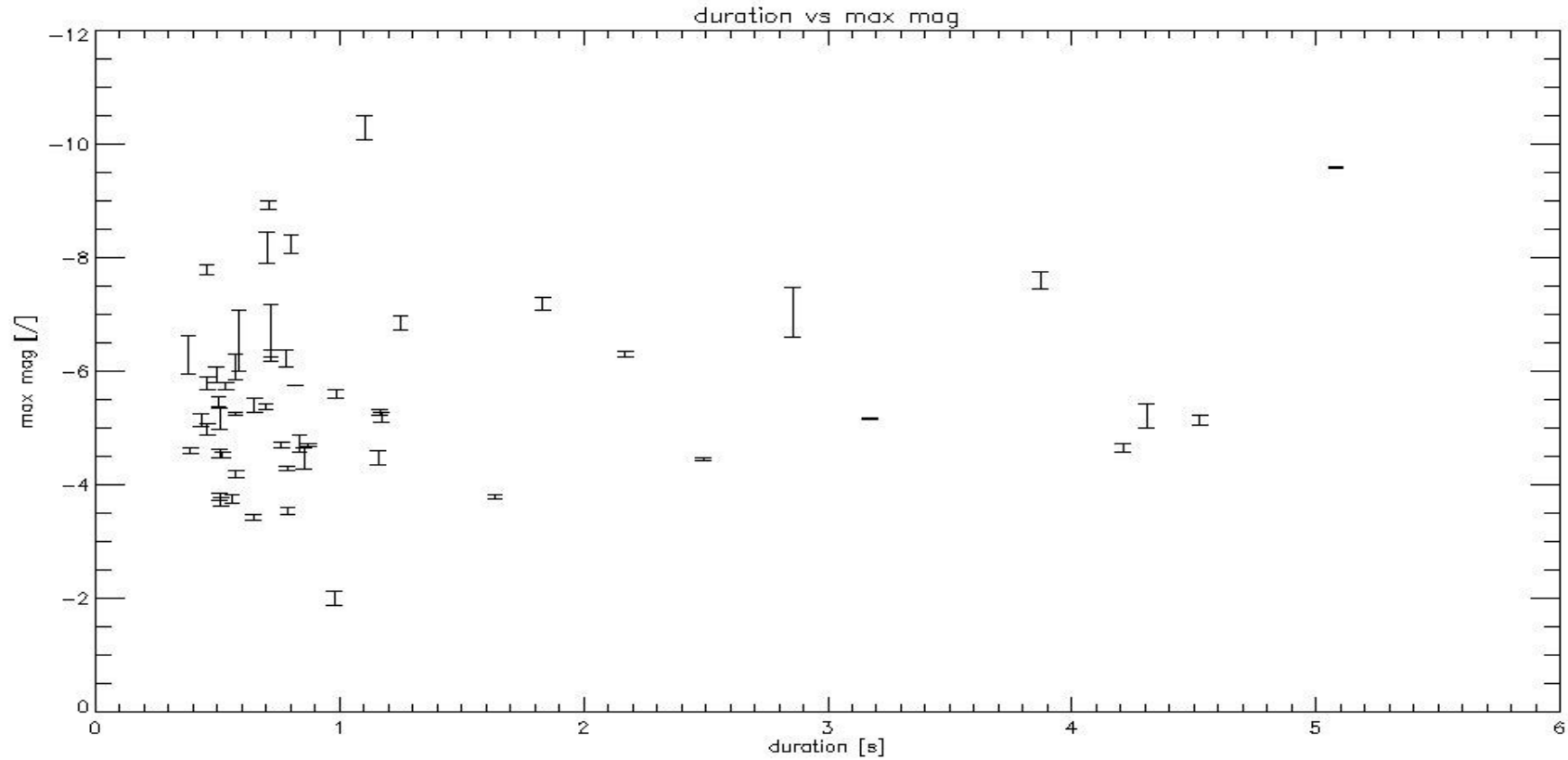
# GRAFICO MAX MAG VS F



# MAX MAG VS P



# DURATA VS MAX MAG



# DURATA VS P

