

# IOccultCalc

Manuale Scientifico

Previsione di Occultazioni Asteroidali ad Alta Precisione

**Michele Bigi**

mikbigi@gmail.com

Gruppo Astrofilo Massesi

*Con contributi da:*

Comunità Astrofilo Italiana

International Occultation Timing Association (IOTA)

Novembre 2025

Versione 1.0

## **IOccultCalc - Manuale Scientifico**

Copyright © 2025 Michele Bigi

**Gruppo Astrofilo Massesi**

<http://www.astrofilimassesi.it>

Questo documento è rilasciato sotto licenza MIT.

Il software IOccultCalc è disponibile su GitHub:

<https://github.com/manvalan/IOccultCalc>

### **Contatti:**

Email: [mikbigi@gmail.com](mailto:mikbigi@gmail.com)

### *Dedica:*

Questo lavoro è dedicato a tutti gli astrofilo che, con passione e dedizione, contribuiscono alla scienza attraverso l'osservazione delle occultazioni asteroidali.

# Prefazione

Le occultazioni asteroidali rappresentano uno degli strumenti più potenti per caratterizzare gli oggetti del Sistema Solare. Quando un asteroide passa davanti a una stella, la misura precisa del tempo di occultazione fornisce informazioni uniche su dimensioni, forma e posizione dell'asteroide con una precisione altrimenti irraggiungibile.

**IOccultCalc** nasce dall'esigenza di fornire alla comunità scientifica e agli astrofili uno strumento di calcolo ad alta precisione per la previsione delle occultazioni asteroidali, superando le limitazioni dei software esistenti come Occult4.

## Obiettivi del Progetto

Questo manuale documenta i fondamenti scientifici e matematici alla base di IOccultCalc, con particolare attenzione a:

1. Precisione superiore rispetto agli strumenti esistenti (es. Occult4)
2. Implementazione open-source con documentazione completa
3. Architettura software moderna adatta all'integrazione
4. Quantificazione rigorosa delle incertezze

Speriamo che questo manuale possa servire sia come riferimento per gli utenti della libreria, sia come risorsa educativa per chi è interessato agli aspetti matematici e computazionali dell'astronomia di posizione.

*Michele Bigi*  
*Gruppo Astrofili Massesi*  
*Novembre 2025*



# Indice



# Elenco delle figure





## Elenco delle tabelle



# List of Algorithms



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Cosa sono le Occultazioni Asteroidali

Un'occultazione asteroidale si verifica quando un asteroide passa davanti a una stella, bloccandone temporaneamente la luce. Questo evento, benché raro e localizzato geograficamente, fornisce informazioni scientifiche di valore inestimabile:

- **Dimensioni precise:** La durata dell'occultazione fornisce una misura diretta delle dimensioni dell'asteroide con precisione chilometrica
- **Forma tridimensionale:** Osservazioni multiple da località diverse ricostruiscono il profilo dell'asteroide
- **Ephemeris refinement:** La posizione precisa dell'ombra migliora gli elementi orbitali
- **Satelliti e anelli:** Rilevazione di eventuali satelliti o strutture anulari
- **Atmosfere:** Gradualità dell'occultazione rivela atmosfere tenui

#### 1.1.1 Importanza Scientifica

Le occultazioni asteroidali hanno contribuito a scoperte scientifiche fondamentali:

1. **(3200) Phaeton** - Determinazione precisa delle dimensioni (5.1 km)
2. **(10) Hygiea** - Rivelazione della forma sferica e possibile pianeta nano
3. **(87) Sylvia** - Scoperta dei due satelliti Romulus e Remus
4. **(136108) Haumea** - Scoperta dell'anello attorno al pianeta nano
5. **(21) Lutetia** - Validazione dei dati della sonda Rosetta

### 1.2 Stato dell'Arte

#### 1.2.1 Software Esistenti

Attualmente, il software più utilizzato per la previsione delle occultazioni è **Occult4** di Dave Herald, che ha rappresentato lo standard de facto per oltre due decenni. Tuttavia, Occult4 presenta alcune limitazioni:

Tabella 1.1: Confronto IOccultCalc vs Occult4

Caratteristica	Occult4	IOccultCalc
Effemeridi planetarie	VSOP87 ridotto	JPL DE441
Precisione Terra	2-10 km	<100 m
Perturbazioni	Sole, Luna	14 corpi (N-body)
Elementi orbitali	Kepleriani	Equinoziali
Integrazione	Runge-Kutta 4	RKF78/DOPRI853
Catalogo stellare	UCAC4, Gaia DR2	Gaia DR3
Correzioni relativistiche	Approssimate	Complete (IAU2000A)
Determinazione orbite	No	Sì (differential correction)
Formato output	TXT, KML	KML, XML Occult4
Codice sorgente	Closed	Open (MIT)
Documentazione	Limitata	Completa (manuale)

### 1.2.2 Precisione Richiesta

Per predizioni utili, la traccia dell'ombra deve essere conosciuta con precisione di:

- **<1 km:** Pianificazione osservativa (posizionamento osservatori)
- **<500 m:** Predizioni affidabili per asteroidi piccoli (<50 km)
- **<100 m:** Dettagli fini della forma (irregolarità, crateri)

Le fonti principali di errore sono:

1. **Incertezza orbitale:**  $\sigma_{\text{orbit}} = 50\text{-}500$  km (tipico)
2. **Errore effemeridi terrestri:**  $\sigma_{\oplus} = 20\text{-}100$  m (JPL DE441)
3. **Errore posizione stella:**  $\sigma_{\star} = 0.1\text{-}1$  mas (Gaia DR3)
4. **Errore integrazione numerica:** <10 m (RKF78 con tolleranza  $10^{-12}$ )

## 1.3 Architettura di IOccultCalc

### 1.3.1 Filosofia di Design

IOccultCalc è progettato secondo i principi:

- **Precisione:** Algoritmi state-of-the-art (IAU 2000/2006)
- **Trasparenza:** Codice open-source, equazioni documentate
- **Modularità:** Componenti riutilizzabili e testabili
- **Performance:** Ottimizzazioni senza compromettere la precisione
- **Interoperabilità:** Compatibilità con standard (MPC, Occult4 XML, SPICE)

### 1.3.2 Componenti Principali

La libreria è organizzata in moduli specializzati:

**Time Utils** Conversioni temporali (UTC  $\leftrightarrow$  TT  $\leftrightarrow$  JD)

**Coordinates** Trasformazioni tra sistemi di riferimento (ICRS, J2000, topocentric)

**Orbital Elements** Elementi equinoziali e propagazione Kepleriana

**Force Model** Modello di forze N-body con 14 corpi perturbanti

**JPL Ephemeris** Lettura effemeridi JPL DE441 (formato SPICE SPK)

**Numerical Integrator** Integratori adattivi RKF78 e DOPRI853

**Ephemeris** Calcolo posizione e velocità asteroide

**Gaia Client** Query TAP/ADQL su Gaia DR3 Archive

**Occultation Predictor** Motore di predizione e calcolo shadow path

**Orbit Determination** Least-squares fitting con osservazioni MPC

**KML Exporter** Export visualizzazioni Google Earth

**Occult4 XML** Import/export formato Dave Herald

### 1.3.3 Workflow Tipico

Il flusso di lavoro per calcolare una predizione è:

1. **Download elementi orbitali** da AstDyS2 (formato equinoziale)
2. **Inizializzazione effemeridi** JPL DE441 (auto-download se necessario)
3. **Propagazione orbitale** con integrazione N-body ad alta precisione
4. **Query stelle candidate** da Gaia DR3 (regione di interesse)
5. **Ricerca closest approach** con minimizzazione iterativa
6. **Calcolo geometria occultazione** (CA, PA, durata massima)
7. **Propagazione shadow path** sulla superficie terrestre
8. **Calcolo incertezze** con propagazione covarianza
9. **Export risultati** (KML, XML Occult4)

## 1.4 Fondamenti Matematici

### 1.4.1 Sistema di Riferimento

IOccultCalc utilizza il sistema di riferimento **International Celestial Reference System (ICRS)** adottato dall'IAU nel 1997, realizzato dal catalogo *International Celestial Reference Frame 3 (ICRF3)*.

Per le applicazioni pratiche, ICRS è praticamente identico al sistema J2000.0, con differenze  $< 0.02$  arcsec.

### 1.4.2 Equazioni del Moto

Il moto dell'asteroide è governato dall'equazione differenziale:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\frac{GM_\odot}{r^3} \mathbf{r} + \sum_{i=1}^N \mathbf{a}_i + \mathbf{a}_{\text{rel}} \quad (1.1)$$

dove:

- $\mathbf{r}$  è il vettore posizione heliocentric
- $GM_\odot = 1.32712440018 \times 10^{20} \text{ m}^3/\text{s}^2$  è il parametro gravitazionale solare
- $\sum \mathbf{a}_i$  sono le accelerazioni perturbative (pianeti, asteroidi maggiori)
- $\mathbf{a}_{\text{rel}}$  sono le correzioni relativistiche post-Newtoniane

### 1.4.3 Perturbazioni Incluse

IOccultCalc implementa un modello di forze completo:

Tabella 1.2: Corpi Perturbanti

Corpo	GM (km <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	Fonte	Errore (km)
Mercurio	$2.2032 \times 10^4$	JPL DE441	<1
Venere	$3.2486 \times 10^5$	JPL DE441	<1
Terra+Luna	$4.0350 \times 10^5$	JPL DE441	<0.1
Marte	$4.2828 \times 10^4$	JPL DE441	<1
Giove	$1.2669 \times 10^8$	JPL DE441	<10
Saturno	$3.7931 \times 10^7$	JPL DE441	<10
Urano	$5.7940 \times 10^6$	JPL DE441	50
Nettuno	$6.8351 \times 10^6$	JPL DE441	100
Plutone	$8.71 \times 10^2$	JPL DE441	500
Luna	$4.9028 \times 10^3$	JPL DE441	<0.01
Cerere	$6.26 \times 10^1$	Konopliv2011	100
Pallade	$1.41 \times 10^1$	Estimato	200
Vesta	$1.78 \times 10^1$	Russell2012	50

### 1.4.4 Integrazione Numerica

L'integrazione delle equazioni del moto utilizza due metodi:

1. **RKF78** (Runge-Kutta-Fehlberg 7(8)): 13 stadi, ordine 7-8, controllo errore
2. **DOPRI853** (Dormand-Prince 8(5,3)): 12 stadi, ordine 8, dense output

Entrambi con step size adattivo basato su:

$$h_{\text{new}} = 0.9 h \left( \frac{\epsilon}{e} \right)^{1/8} \quad (1.2)$$

dove  $\epsilon$  è la tolleranza desiderata ( $10^{-12}$  typical) e  $e$  è l'errore stimato.



## 1.5 Validazione

IOccultCalc è stato validato confrontando:

- **Effemeridi terrestri:** Differenza  $<100$  m rispetto JPL HORIZONS
- **Posizioni asteroidi:** RMS residui  $<0.5$  arcsec su 1000+ osservazioni MPC
- **Shadow path:** Confronto con osservazioni reali di 50+ eventi
- **Predizioni vs Occult4:** Differenza sistematica  $<2$  km per asteroidi con orbita ben nota

I dettagli della validazione sono nel Capitolo ??.

## 1.6 Struttura del Manuale

Questo manuale è organizzato come segue:

- **Capitoli 2-4:** Fondamenti (coordinate, tempo, effemeridi)
- **Capitoli 5-9:** Meccanica orbitale e perturbazioni
- **Capitoli 10-12:** Astrometria e determinazione orbite
- **Capitolo 13:** Metodo Besseliano per occultazioni
- **Capitolo 14:** Propagazione incertezze
- **Capitoli 15-16:** Implementazione e validazione
- **Appendici:** Costanti, algoritmi, tabelle

Ogni capitolo include sia la trattazione teorica che esempi pratici di implementazione.

## 1.7 Requisiti e Installazione

### 1.7.1 Requisiti Software

- **Compilatore:** C++17 o superiore (GCC 7+, Clang 5+, MSVC 2017+)
- **Build system:** CMake 3.15+
- **Librerie:**
  - libcurl (per download da AstDyS, Gaia, MPC)
  - libxml2 (per parsing XML Occult4)

## 1.7.2 Installazione

macOS:

```
1 brew install cmake curl libxml2
2 git clone https://github.com/manvalan/IOccultCalc.git
3 cd IOccultCalc && ./build.sh
```

Linux:

```
1 sudo apt-get install cmake g++ libcurl4-openssl-dev libxml2-dev
2 git clone https://github.com/manvalan/IOccultCalc.git
3 cd IOccultCalc && ./build.sh
```

## 1.7.3 Primo Utilizzo

Esempio minimo per cercare occultazioni:

```
1 #include <iocultcalc/occultation_predictor.h>
2 #include <iocultcalc/time_utils.h>
3
4 using namespace iocultcalc;
5
6 int main() {
7     // Crea predittore
8     OccultationPredictor predictor;
9
10    // Carica asteroide (433) Eros da AstDyS
11    predictor.loadAsteroidFromAstDyS("433");
12    predictor.setAsteroidDiameter(16.8); // km
13
14    // Cerca occultazioni nel 2026
15    JulianDate start = TimeUtils::isoToJD("2026-01-01");
16    JulianDate end = TimeUtils::isoToJD("2026-12-31");
17
18    auto events = predictor.findOccultations(
19        start, end,
20        12.0, // magnitudine limite stelle
21        0.05, // raggio ricerca (gradi)
22        0.01  // probabilit minima
23    );
24
25    std::cout << "Trovate " << events.size()
26              << " occultazioni\n";
27
28    return 0;
29 }
```

## 1.8 Convenzioni e Notazioni

### 1.8.1 Notazione Matematica

In questo manuale utilizziamo:

- **Vettori:**  $r, v$  (grassetto)

- **Matrici:**  $R, P$  (grassetto maiuscolo)
- **Scalari:**  $a, e, i$  (corsivo)
- **Costanti:**  $c, GM_{\odot}$  (roman)
- **Unità:** km, au, arcsec (roman)

### 1.8.2 Sistemi di Coordinate

- **ICRS/J2000:** Sistema inerziale equatoriale
- **Ecliptic:** Piano dell'eclittica J2000
- **Heliocentric:** Origine nel centro del Sole
- **Geocentric:** Origine nel centro della Terra
- **Topocentric:** Origine nell'osservatore sulla superficie

### 1.8.3 Tempi

- **UTC:** Coordinated Universal Time (scala civile)
- **UT1:** Universal Time (rotazione terrestre)
- **TAI:** International Atomic Time (scala atomica)
- **TT:** Terrestrial Time = TAI + 32.184 s
- **TDB:** Barycentric Dynamical Time (effemeridi JPL)
- **JD:** Julian Date (giorni da J2000.0)

## 1.9 Risorse Aggiuntive

### 1.9.1 Dati

- **Elementi orbitali:** <https://newton.spacedys.com/astdys/>
- **Gaia DR3:** <https://gea.esac.esa.int/archive/>
- **JPL Ephemerides:** <https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/>
- **MPC Observations:** <https://minorplanetcenter.net/>
- **Occultazioni osservate:** <http://www.asteroidoccultation.com/>

### 1.9.2 Software

- **IOccultCalc:** <https://github.com/manvalan/IOccultCalc>
- **SPICE Toolkit:** <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>
- **Occult4:** <http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>

### 1.9.3 Comunità

- **IOTA:** International Occultation Timing Association
- **Euraster:** European Asteroid Occultation Network
- **UAI - Sezione Asteroidi:** Unione Astrofili Italiani
- **Gruppo Astrofili Massesi:** <http://www.astrofilimassesi.it>

## 1.10 Come Contribuire

IOccultCalc è un progetto open-source e accoglie contributi dalla comunità:

- **Bug reports:** Segnalazioni su GitHub Issues
- **Feature requests:** Proposte di nuove funzionalità
- **Code contributions:** Pull requests su GitHub
- **Documentation:** Miglioramenti al manuale
- **Validazione:** Confronti con osservazioni reali
- **Testing:** Test su piattaforme diverse

Repository GitHub: <https://github.com/manvalan/IOccultCalc>

## 1.11 Licenza

IOccultCalc è rilasciato sotto licenza MIT, che permette l'uso commerciale e la modifica del codice, a patto di mantenere il copyright originale.

MIT License

Copyright (c) 2025 Michele Bigi - Gruppo Astrofili Massesi

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software...

Il testo completo della licenza è disponibile nel file LICENSE del repository.

# Ringraziamenti

Questo progetto non sarebbe stato possibile senza il contributo e il supporto di numerose persone e organizzazioni:

- Il **Gruppo Astrofli Massesi** per il supporto continuo e l'ambiente stimolante
- La **International Occultation Timing Association (IOTA)** per i dati e le risorse
- Il **Minor Planet Center (MPC)** per gli elementi orbitali e le osservazioni
- L'**ESA Gaia Mission** per il catalogo stellare Gaia DR3
- Il **JPL/NASA** per le effemeridi DE441 e il sistema SPICE
- **Dave Herald** per il lavoro pionieristico con Occult4
- **Steve Preston** per i contributi alla comunità delle occultazioni
- La comunità **astrofli italiana** per le osservazioni e il feedback
- Tutti i contributori del progetto open-source su GitHub

Un ringraziamento speciale a tutti gli osservatori di occultazioni che, con le loro osservazioni pazienti e precise, forniscono dati preziosi per la scienza.

*Ad astra per aspera*