

Introduzione

Questi *appunti* servono sia per il Corso di Astronomia I del Corso di Studi in Astronomia che per quello di Elementi di Astronomia a Astrofisica del Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale. Servono come ausilio, ma non sostituiscono i testi di riferimento, e non riflettono necessariamente quanto effettivamente svolto a lezione

Informazioni sull'Universo

Lo studio dell'Universo viene compiuto in vari modi, da un lato sfruttando le informazioni che pervengono da due distinti canali, quello della **radiazione elettromagnetica** (il canale primario) e quello **materiale** (canale ancora secondario), dall'altro con strumenti piazzati sul **suolo terrestre** ovvero in **orbita circumterrestre** ovvero anche in **orbite circumplanetarie** e perfino **sul suolo** di alcuni corpi del sistema solare.

Nel prosieguo delle *Lezioni* vedremo essenzialmente **il canale elettromagnetico** con strumenti dal suolo, cioè l'astronomia più tradizionale, ma darò qualche elemento basilare sulle altre modalità prima accennate.

V'è un fortissimo interesse ingegneristico, che va dal settore meccanico a quello ottico a quello elettronico e delle telecomunicazioni.

Potremmo anche dire che mentre il canale elettromagnetico ci consente di osservare l'Universo sino alle profondità cosmologiche, il canale materiale dallo spazio ha aperto la possibilità di esplorare i corpi più vicini, sia con esplorazione umana che robotica. L'esplorazione dello spazio extra sistema solare è ancora materia di un futuro lontanissimo, e in realtà imprevedibile.

Il canale materiale - 1

Possiamo studiare varie forme di **materia** extraterrestre:

- Raccogliendo i **meteoriti** che occasionalmente arrivano a terra (un'ottima 'miniera' è l'Antartide, i meteoriti vengono intrappolati dal ghiaccio e magari dopo migliaia di anni riaffiorano in superficie e sono visibilissimi), e la **polvere interplanetaria** flottante a 20-40 km di quota con aerei stratosferici, o incidentalmente catturate dai pannelli solari o dalle pareti di navette spaziali orbitanti attorno alla terra
- catturando **grani di polvere cometaria e interplanetaria** con adatti sensori piazzati su missioni planetarie (e.g. Galileo, Rosetta, Stardust)
- studiando le **rocce lunari** portate a terra dagli equipaggi delle missioni Apollo (circa 380 kg) e delle missioni robotiche sovietiche Lunakhod (poche centinaia di grammi)
- raccogliendo **campioni di rocce marziane**, e esaminandole in situ (ad es. le passate missioni Viking, o gli odierni Mars Rovers) o riportandole nel laboratorio terrestre (grandi speranze per il futuro). Si potrebbe sperare anche di trivellare il suolo sino a qualche metro di profondità.

Il canale materiale - 2

- lo stesso procedimento di raccolta di **campioni di suolo** si può fare con sonde che atterrino su asteroidi (la missione giapponese Hayabusa) o comete (Rosetta)
- studiando **atomi neutri** provenienti dallo spazio interstellare mediante sensori piazzati su sonde interplanetarie (e.g. Ulysses), e **atomi e molecole ionizzate** provenienti dal Sole (il cosiddetto vento solare) o dallo spazio interstellare, come fece la (sfortunata) missione Genesis. Lo studio della *materia ionizzata* è complicata dalla presenza del **campo magnetico** terrestre, solare e interplanetario, che in virtù della forza di Lorentz deflette e intrappola gli ioni. Una vivida rappresentazione della interazione tra particelle ionizzate (in questo caso di origine solare) e il campo magnetico terrestre è rappresentato dalle *aurore boreali*. Aurore boreali sono state osservate anche attorno ai poli di Giove e Saturno.
- studiando i **raggi cosmici**, che sono particelle di altissima energia provenienti da sorgenti a distanze cosmiche
- studiando i **neutrini** solari o interstellari, e sperabilmente anche le **onde gravitazionali**.

L'interesse dello spazio extraterrestre

Oltre agli effetti del già citato campo magnetico sulle particelle ionizzate (*ma non su quelle neutre, nè sui fotoni!*), l'osservazione dal suolo terrestre è fortemente limitata dalla presenza della **atmosfera**, cui dedicheremo una lezione specifica. Osservazioni di fotoni di alta energia (dai raggi gamma a quelli X a quelli UV) e del lontano Infrarosso (dal 20 micrometri fino a qualche mm) sono in pratica possibili da quote che vanno dai 40 km di palloni e sonde stratosferici (tuttavia con un notevole residuo di aria), ai 200 km dei voli sub-orbitali di corta durata (sounding rockets, voli parabolici) ai 300 km della Stazione Spaziale, ai 600 km dell'Hubble Space Telescope, fino al milione e mezzo di km di sonde nei punti lagrangiani del Sistema Terra-Sole, come SoHO (vedi lezioni successive per la definizione di punti lagrangiani).

L'esplorazione umana è stata sinora limitata a voli sino a 600 km (oggi la Stazione Spaziale), con la notevolissima eccezione delle missioni Apollo sulla Luna negli anni '70. Vedremo in futuro.

L'Astronomia Elettromagnetica



Concentreremo la nostra attenzione sulla astronomia condotta mediante **onde elettromagnetiche** (o anche i **fotoni**), restringendo la trattazione a quella condotta 'classicamente' nella regione del visibile e del vicino infrarosso (VIS – NIR)

Astronomia Sferica e Astronomia Dinamica

Con il nome di *astronomia sferica* si indica la rappresentazione formale e sistematica delle posizioni e movimenti apparenti degli astri sulla volta celeste.

La parola *astrometria* indica i diversi metodi di misura e analisi di posizioni e movimenti.

Con il nome di *astronomia dinamica*, o *meccanica celeste*, si indica lo studio delle forze responsabili di tali movimenti, sia basati sulla meccanica newtoniana che sulla relatività generale.

Limiti della trattazione

Il trattamento qui esposto sarà *essenzialmente pre-relativistico*, in grado di produrre precisioni *non migliori di qualche centesimo di secondo d'arco*, e anzi spesso ci si accontenterà di precisioni di vari decimi di secondo d'arco. Questo era il livello praticamente ottenibile prima del satellite astrometrico europeo Hipparcos del 1997, che ha raggiunto precisioni di qualche *millesimo di arcsec*.

Oltre alla minor complicazione matematica e concettuale, la trattazione 'classica' consente di *sommare uno sull'altro* i vari effetti, senza preoccuparsi troppo dell'ordine in cui lo si fa. Questa semplicità viene meno in Relatività, sia ristretta che generale.

Occasionalmente daremo qualche cenno sui limiti classici, che sono già stati scavalcati con Hipparcos, e che dovranno ancor più essere superati con future missioni spaziali quali GAIA (anch'essa europea) che tende a precisioni della *decina di microarcsec*. Useremo due parametri per quantificare il confine tra la trattazione classica e quella relativistica, cioè il *rapporto tra la velocità dell'osservatore e la velocità della luce*, e il *raggio di Schwarzschild*.

Parametri relativistici - 1

Relatività ristretta

Il parametro fondamentale è il rapporto:

$$\theta = \frac{V}{c} + \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2} + L \approx \frac{V}{c} \quad c = \text{velocità della luce} = 2,998 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

espresso in radianti (oppure $\theta/206264.8\dots$ se vogliamo secondi d'arco, indicati con ").

Esempio:

$V = 30 \text{ km/s}$ (velocità orbitale media della Terra)

$\theta \approx 0.0001 \text{ rad} \approx 20''.6$, che è il valore della **aberrazione annua** della luce.

Le differenze con il valore relativistico sono dell'ordine di $\theta^2 \approx 0''.002$ (si veda dopo per la dimostrazione di come esprimere le **potenze superiori alla prima**).

Per cui se trascuriamo i termini del secondo ordine commettiamo un errore di pochi millesimi di secondo d'arco, **che però sono confrontabili con la precisione ottenuta dal satellite astrometrico Hipparcos**, e quindi da tenersi in considerazione in tale applicazione, e ancor di più in GAIA (vedi lezioni successive).

Parametri relativistici - 2

Relatività Generale:

La relatività generale (quando interviene la massa, dinamica) trova varie applicazioni, tra cui la più generale è lo studio dell'Universo (cosmologia).

Qui ci limitiamo a due parametri fondamentali:

1 - il raggio di Schwarzschild

$$R_s = 2GM / c^2 \quad [\text{lunghezza}]$$

in cui G è la costante di gravitazione universale, che vale 6.67×10^{-8} (cgs).

Ad es. $M = 1$ massa solare, $R_s = 3.0$ km; $M = 1$ massa terrestre, $R_s = 0.89$ cm.

Se un oggetto si contraesse sino a raggiungere il limite di Schwarzschild, il potenziale gravitazionale diverrebbe così alto che nemmeno i raggi di luce potrebbero uscire da esso. L'oggetto diviene allora un 'buco nero'.

Si conoscono oggi buchi neri di diversissime masse, da quelle stellari (poche masse solari) a quelle galattiche (da 10^6 a 10^{12} masse solari)

Parametri relativistici - 3

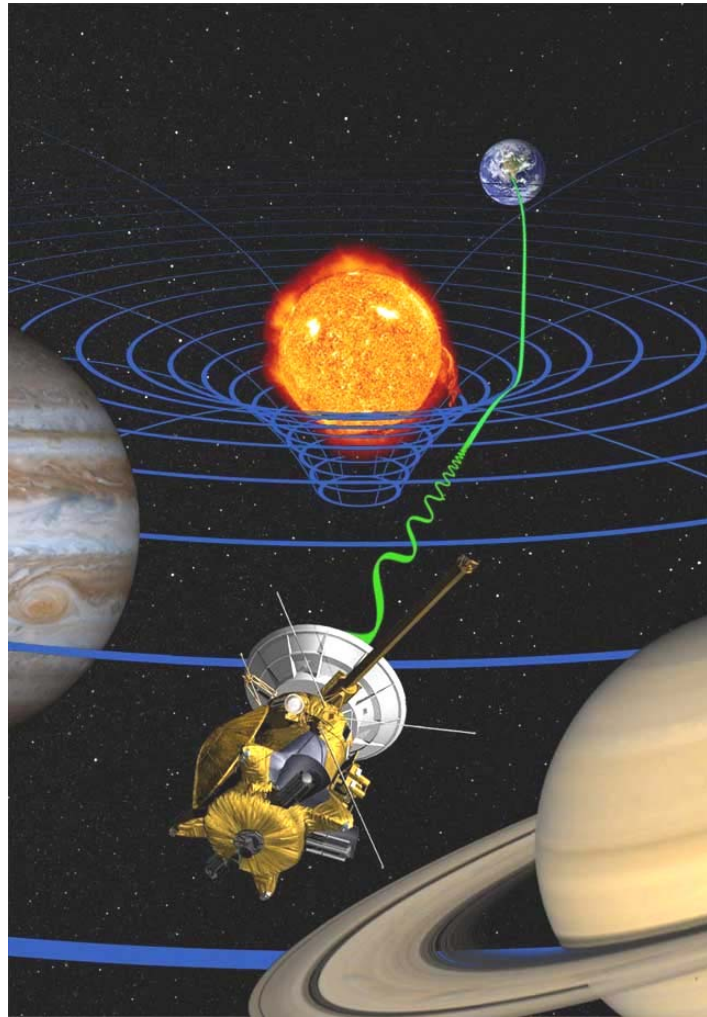
2 - la deflessione gravitazionale della luce, cioè l'angolo:

$$\Delta\theta = 4 \frac{R_s}{R} = 4 \frac{R_s}{d_{\odot} \alpha_{\odot}}$$

in cui R è la distanza perpendicolare tra il centro della massa M e il raggio di luce. Nel caso del Sole (seconda uguaglianza), d_{\odot} è la distanza Terra-Sole, e α_{\odot} l'angolo tra il raggio di luce e il centro del Sole.

Al bordo del disco solare ($R = 7 \times 10^5$ km, $d_{\odot} = 1.5 \times 10^8$ km, $\alpha_{\odot} = 16'$): $\Delta\theta = 1''.84$,
a 90° dal disco $\Delta\theta = 0''.004$, che di nuovo è confrontabile con la precisione del satellite Hipparcos.

Parametri relativistici - 4



Invece di una deflessione angolare, possiamo misurare il **ritardo temporale** (detto anche ritardo di Shapiro) nella propagazione di un segnale radio, che è il modo più preciso di fare la misura, e al contempo verificare la validità della relatività generale. Il ritardo può essere scritto come:

$$\Delta t = -\frac{2GM}{c^2} \frac{1}{c} \ln(1 - \cos \alpha)$$

dove α è l'angolo sotteso all'osservatore dalla sorgente e dalla massa gravitazionale (ad es. l'angolo tra il satellite e il Sole). Una tra le misure in assoluto più precise è stata effettuata da Bertotti e Iess grazie ai segnali verso e da la sonda Cassini, durante il viaggio verso Saturno.

Visione geocentrica e suo superamento

Inizieremo lo studio dell'astronomia sferica usando solo concetti **geometrici, senza preoccuparci delle basi fisiche**. Storicamente, l'astronomia iniziò in questa maniera alcuni millenni orsono, portando alla concezione **geocentrica** del mondo che trovò la sua massima espressione in Ipparco (II secolo aC) e poi in Claudio Tolomeo (II secolo dC), concezione che sopravvisse fino a Copernico (XV secolo).

Tale visione geocentrica è ***pienamente adeguata agli scopi presenti***, ma quando investigheremo la dinamica dei corpi (pianeti, asteroidi, comete, satelliti artificiali, o infine i moti delle stelle nella Via Lattea o delle galassie), dovremo introdurre **operativamente** dei sistemi di riferimento che siano il più possibile inerziali, per potervi correttamente applicare le leggi newtoniane. Il Sole, o meglio il **baricentro del Sistema Solare**, diverrà allora l'origine privilegiata. Su scala più ampia (ma al di fuori di questo Corso), si dovrà passare a un riferimento galattocentrico, e poi a uno collegato con l'insieme delle galassie vicine.

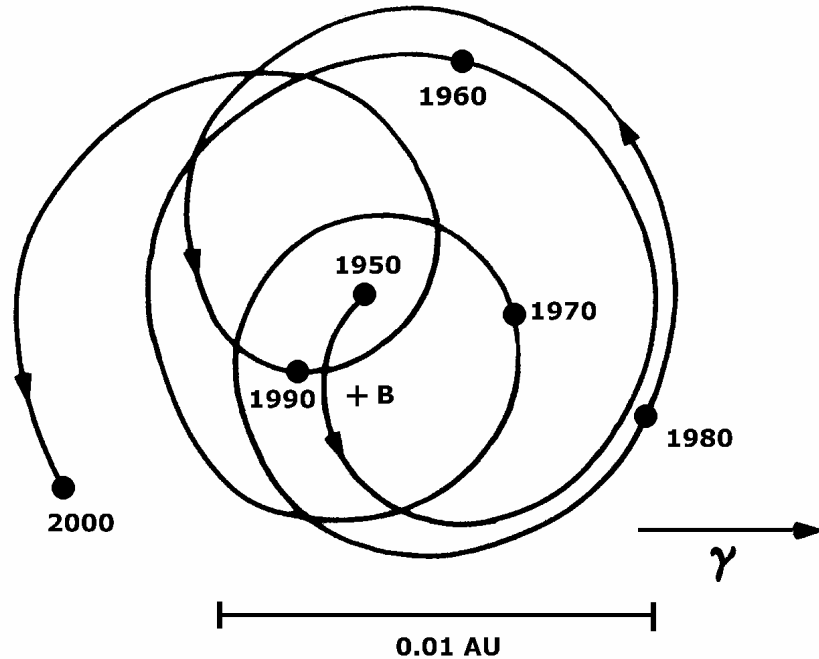
Origine del sistema di riferimento

Operativamente, l'origine di **qualsunque** sistema astronomico, sia esso cartesiano che polare, è **il sito da dove si osserva**, e dunque l'osservatorio astronomico terrestre, oppure l'aereo o il satellite artificiale o il suolo marziano, etc.

Da questa origine **topocentrica** ci si può trasferire, **per mezzo di operazioni matematiche quali le rotazioni e le traslazioni**, a un altro luogo non direttamente accessibile, ad es. al centro della Terra (coordinate **geocentriche**, serve conoscere la forma del geoide e la localizzazione dell'osservatore su di esso), oppure al centro del Sole (e si hanno coordinate **eliocentriche**) oppure a quelle del baricentro del Sistema Solare (coordinate **baricentriche**), oppure infine al centro della Via Lattea (coordinate **galattocentriche**, da non confondere con quelle **galattiche**, la cui origine è geocentrica).

Altri esempi: da coordinate topocentriche lunari si possono ricavare coordinate selenocentriche. Oppure, dalle immagini della sonda Rosetta si vogliono ricavare le coordinate della cometa rispetto al baricentro del sistema solare.

Esempio: posizione del centro del Sole rispetto al baricentro **B** del sistema solare



La figura mostra che il baricentro **B** del sistema solare può essere apprezzabilmente esterno al disco del Sole. Il pianeta di gran lunga dominante in queste considerazioni è Giove, la cui massa è circa 1/1000 della massa del Sole. Intervengono poi Saturno, Venere, la Terra, e gli altri pianeti.

Questo esempio verrà illustrato con maggior dettaglio in seguito, qui si vuole dare un'idea delle distanze coinvolte in possibili traslazioni dell'origine. Si ricordino i seguenti valori approssimati:

- il raggio del Sole è 7×10^5 km.
- 1 Unità Astronomica è pari a 1.5×10^8 km = 200 raggi solari.

Distanza e indicatori di distanza

In astronomia, la misura diretta della distanza r al generico corpo celeste \mathbf{P} è di solito impossibile, eccetto per pochi e particolari casi (corpi del sistema Solare, stelle vicine), mediante la misura delle **parallassi trigonometriche, distinte in:**

- **diurne** (linea di base: **raggio equatoriale terrestre**)
- **annue** (linea di base: **raggio dell'orbita terrestre**), di cui parleremo in dettaglio più avanti.

Per la quasi totalità dei corpi celesti, ci dobbiamo accontentare di **indicatori di distanza**, soggetti a una varietà di errori **sistematici**.

Dunque, l'astronomo non può ottenere direttamente le coordinate cartesiane di \mathbf{P} , (x, y, z) , mentre gli è possibile misurare con grandissima precisione due angoli ad esso relativi (λ, β) .

Tutti i corpi celesti appaiono infatti come sorgenti di luce (puntiformi nel caso delle stelle, estesi per Sole, Luna, nebulose etc.) proiettate su una sfera celeste bidimensionale con l'osservatore al centro; **il raggio della sfera è arbitrario**, lo considereremo **infinito** quando guardiamo la sfera dal centro, oppure **unitario** quando la guardiamo dall'esterno (come su un globo celeste).

Parallassi (trigonometriche) diurne

Abbiamo prima distinto due tipi di parallassi trigonometriche, quelle diurne e quelle annue.

Per gli oggetti del sistema solare, il raggio terrestre è una base sufficientemente lunga, mediante la quale si definisce la parallasse orizzontale diurna di quel corpo celeste (cioè *l'angolo sotto cui dal corpo, sia esso pianeta, o cometa, o asteroide si vede perpendicolarmente il raggio equatoriale terrestre*, che vale circa 6380 km):

- la parallasse orizzontale diurna del Sole vale circa $8''.9$; la distanza corrispondente, cioè circa $206264.8 \times 6380 = 1.49 \times 10^8$ km, si dice **Unità Astronomica** (che per ora possiamo identificare con la distanza media Terra-Sole).

- la parallasse orizzontale della Luna è di circa 1 grado; **la parallasse orizzontale dei pianeti cambia con la loro posizione lungo l'orbita.**

Parallassi (trigonometriche) annue

Al di fuori del sistema solare, la *parallasse trigonometrica annua*, cioè l'angolo sotto cui dalla stella si vede perpendicolarmente l'Unità Astronomica, è in pratica l'unico indicatore di distanza di alta precisione.

La distanza da cui l'UA sottende un angolo di 1" si dice *parsec*; evidentemente:

$$1 \text{ pc} = 206264.8 \text{ UA} \approx 2 \times 10^6 \times 1.5 \times 10^8 \text{ km} \approx 3.1 \times 10^{13} \text{ km}$$

Se misuriamo parallassi con un errore $\sigma \approx 0''.001$ (come con Hipparcos), l'orizzonte di Universo misurabile direttamente è di appena $1/3\sigma \approx 300$ parsec.

Al di là, dobbiamo usare *indicatori di distanza* opportunamente calibrati sulle stelle più vicine.

Alcuni *indicatori di distanza*

Luminosità assoluta (*parallassi fotometriche*)

Variabilità fotometrica (es. stelle variabili di tipo RR-Lyr, o di tipo Cefeidi, etc., che mostrano una *relazione periodo-luminosità assoluta*)

Moti propri (parallassi secolari, statistiche)

Classificazione spettrale (raggio e luminosità, *parallassi spettroscopiche*)

Assorbimento interstellare

Curva di rotazione galattica

Velocità radiale (in Cosmologia: espansione dell'Universo)

Diametro apparente (ad es. delle nebulose planetarie)

e altri ancora. Alcuni di questi indicatori sono di **carattere statistico**, si applicano cioè a particolari gruppi di oggetti, ma ***non dicono molto sul singolo oggetto.***