

Antonio Bianchini

antonio.bianchini@unipd.it

Lezioni di

ASTRONOMIA

per il corso di Laurea in Matematica

PARTE 0 - 1

INTRODUZIONE ALL'ASTROFISICA

DOMINIO DELL'ESPERIENZA UMANA E DELLA REALTÀ FISICA CONOSCIUTA

	Esperienza umana		Fenomeni naturali	
	Intervallo	Rapporto	Intervallo	Rapporto
1. MASSA	$10^{-3} - 10^2$ Kg	10^5	$10^{-27} - 10^{30}$ Kg	10^{57}
2. DIMENSIONI	$10^{-3} - 10^2$ m	10^5	$10^{-30} - 10^{26}$ m	10^{56}
3. TEMPI	$10^{-1} - 10^9$ sec	10^{10}	$10^{-20} - 10^{17}$ sec	10^{37}
4. VELOCITÀ	0 - 30 m/sec		0 - 3×10^8 m/sec	

ASTRONOMIA

Analizza

le
che

giungono
dall'ambiente
extra-terrestre.

INFORMAZIONI

RAGGI
COSMICI

POLVERI E METEORITI

ONDE GRAVITAZIONALI

RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA

γ

X

FUV

UV

OPTICAL

IR

mm

Radio

lenti
specchi

STRUMENTI "OTTICI"

- 1) OTTICA GEOMETRICA *cammino ottico, ray-tracing*
- 2) OTTICA ONDULATORIA *diffrazione, interferenza, risoluzione, interazione con materia....*
- 3) OTTICA QUANTISTICA *spiega tutto....*

- 1) : *cenni, lenti e specchi, principio di Fermat*
- 2) : *onde, onde e.m., sovrapposizione di onde, interferenza, diffrazione, interazione con materia*
- 3) : *"affianco" le spiegazioni al punto 2) + "conteggio fotoni"*
- 4) : *laboratorio e strumenti astronomici*

Astronomia e astrofisica

I fenomeni astronomici sono in larga misura dei tipici *fenomeni storici*, irripetibili in tutti i loro dettagli. Perciò lo studio dei processi fisici in *ambiente astronomico* deve, prima di tutto, selezionare gli osservabili utili a descrivere il fenomeno che ci interessa e poi raccogliere un gran numero di osservazioni indipendenti di quel fenomeno.

Affinché le osservazioni rappresentino dei veri e propri esperimenti di laboratorio bisogna che gli strumenti usati forniscano delle *misure quantitative* delle grandezze osservate.

Le osservazioni possono essere condotte (i) su diversi oggetti nei quali uno stesso fenomeno avviene in condizioni fisiche diversificate, oppure (ii) su uno stesso oggetto in cui quel fenomeno viene colto in tempi diversi della sua evoluzione (come avviene, ad esempio, nell'ambito della panteologia). In entrambi i casi noi assumiamo di avere effettuato degli esperimenti indipendenti ed anche che ogni futura osservazione possa essere considerata come una ripetizione di esperimenti già eseguiti. Questo concetto diventa più chiaro quando si dispone di un modello teorico interpretativo del fenomeno osservato e quindi conosciamo quali siano le condizioni al contorno al momento di ogni singola osservazione. È in questo modo che si realizza in astronomia (ma questo problema riguarda anche altre scienze, come, ad esempio, la biologia...) la ripetibilità dell'esperimento.

L'astronomia è stata
"madre" di molte discipline.

- * La sua prima "applicazione" di stampo moderno è stata la misura del tempo.
- * Ha poi "ispirato" la "meccanica" e la fisica in generale.
- * Dopo la meccanica, ha "ispirato" la "fisica di base" e lo studio dei "processi fisici fondamentali" (Verifica e scoperta di leggi fisiche...)
- * Ha infine (ma anche nella mitologia antica) "prodotto" la "cosmologia" (teorie evolutive della materia e del cosmo...)

L'Astronomia, e lo studio dell'Astronomia, presentano tre aspetti:

matematico (storicamente, il primo)
coordinate celesti, sistemi di riferimento, misura del tempo, distanze e moto degli astri, analisi statistiche....

fisico (storicamente, il secondo...)
processi fisici fondamentali, studio di processi fisici in condizioni "ambientali" "estreme", non riproducibili in laboratori terrestri

evolutivo (storicamente, l'ultimo..... e, tuttavia, anticamente "cosmogonico"....)
Dallo studio fisico e statistico dei dati si passa ai modelli evolutivi della materia e del Cosmo....



In Astronomia:

necessità di costruire modelli
evolutivi sulla base di
dati "istantanei".....

quindi:

Necessità di utilizzare metodi
"statistici".

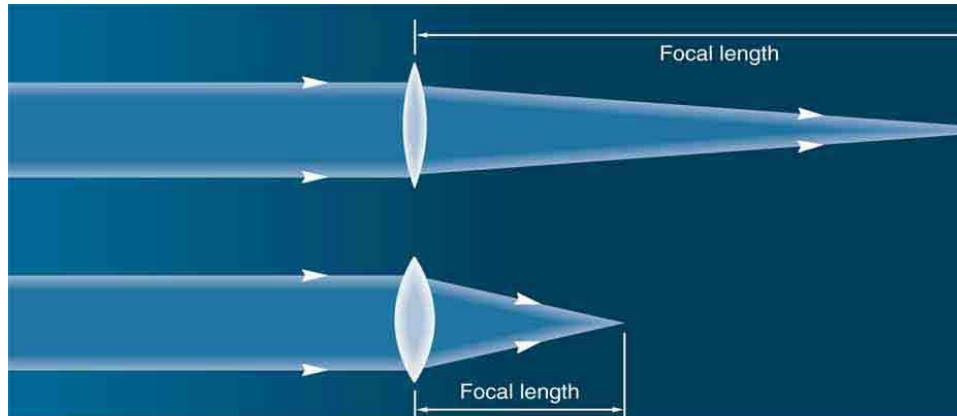
Osservazione: definizione e misura degli "osservabili"
Costruzione di "funzioni di distribuzione"....

Individuazione delle "correlazioni" e
dei loro gradi (livelli) di confidenza -

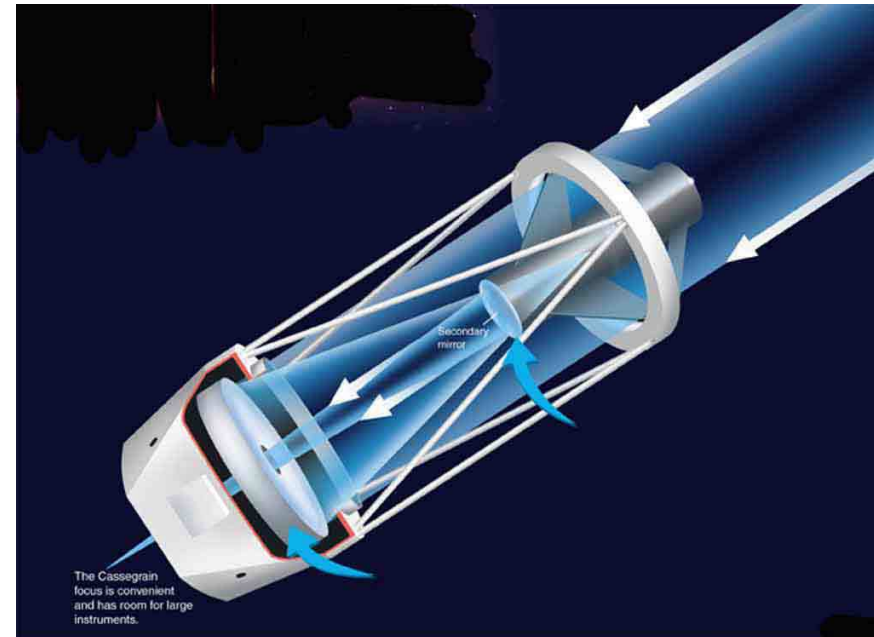
Verifica della corrispondenza, o relazione
funzionale, tra gli "OSSERVABILI" ed i
parametri fisici fondamentali dei sistemi
celesti.

Ricerca di modelli interpretativi...
..... modelli evolutivi e verifica dei processi
fisici fondamentali!

I TELESCOPI



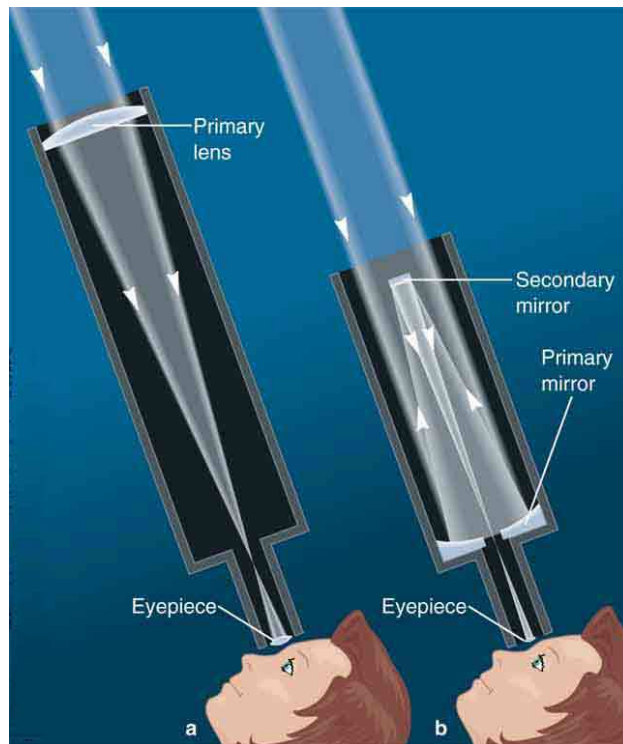
© 2004 Thomson - Brooks Cole



© 2004 Thomson - Brooks Cole

Slide 18

p. 78



© 2004 Thomson - Brooks Cole

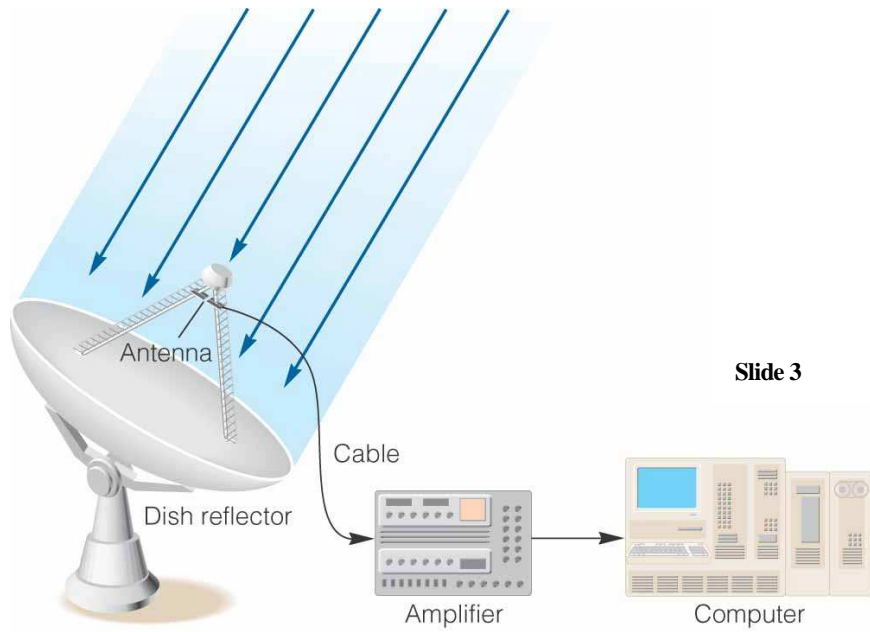
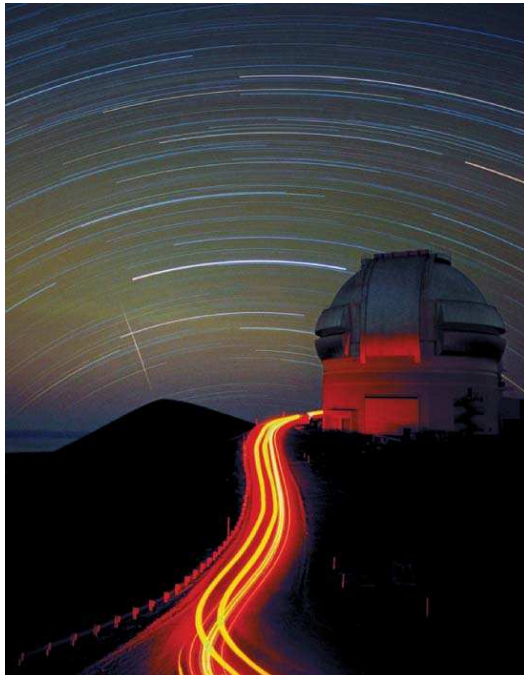
Slide 9



© 2004 Thomson - Brooks Cole

Fig. 5-5, p. 73 20

p. 78



© 2004 Thomson/Brooks Cole
Slide 34

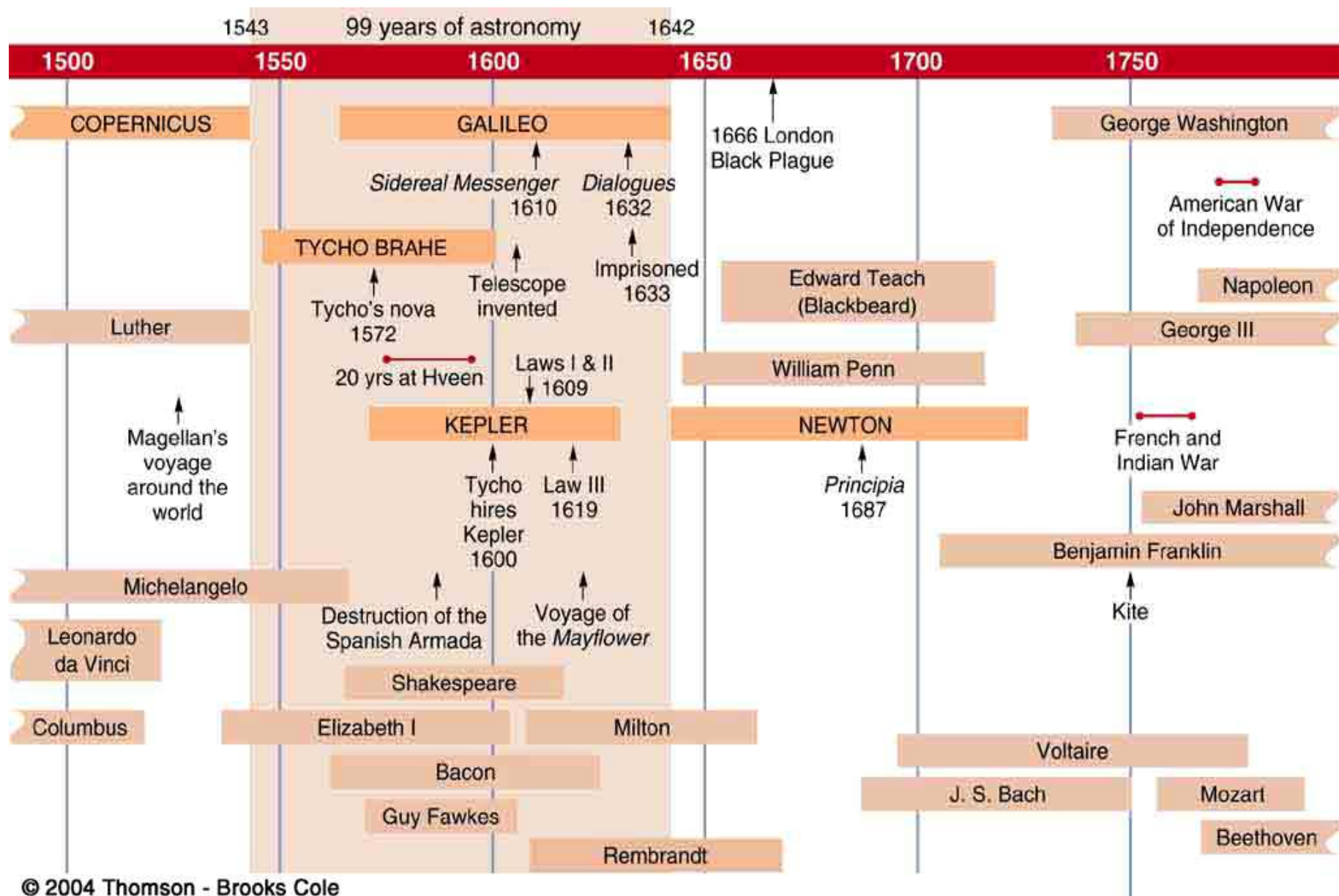
Slide 3

Fig. 5-17a, p. 84



© 2004 Thomson/Brooks Cole

Fig. 5-1b, p. 69



L'esperienza ha dimostrato che i vari tipi di ambienti astronomici (pianeti, stelle, nebulose, galassie) sono dei laboratori privilegiati per lo studio sistematico di molti processi fisici fondamentali in condizioni ambientali di densità, temperature e velocità spesso non realizzabili in laboratori terrestri.

Questo ha fatto sí che oggi si parli più spesso di *fenomeni astrofisici* che di *fenomeni astronomici*, quasi relegando il concetto di fenomeno astronomico al solo campo della meccanica celeste applicata al nostro sistema solare.

Nasce quindi l'*astrofisica teorica*, la scienza che vuole descrivere, comprendere e prevedere l'insieme dei fenomeni che si producono nell'Universo.



What do you do when
you don't understand
the data?

CLASSIFY!

**X e UV si osservano
solo dallo spazio ...**

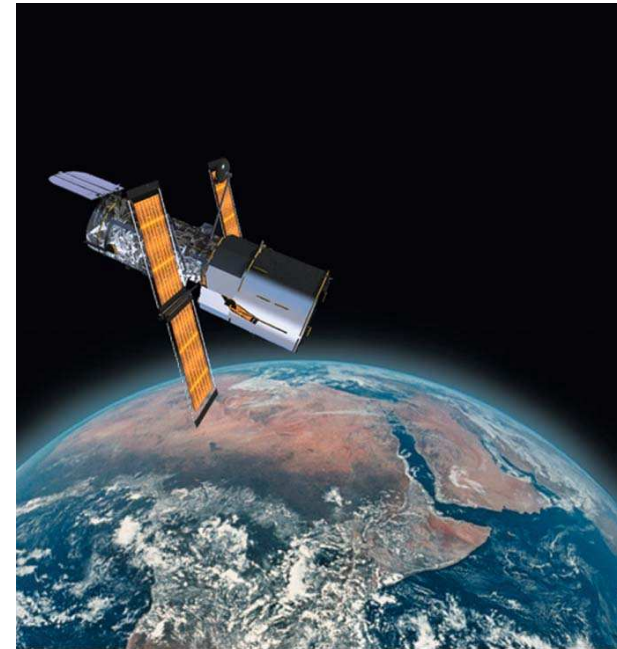
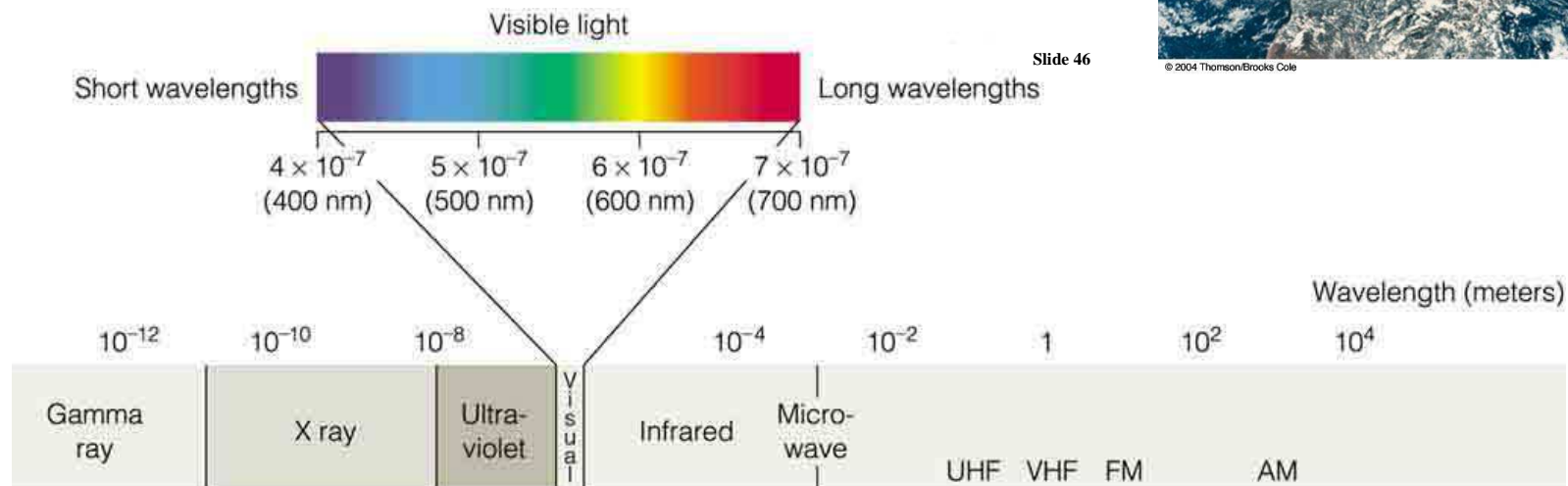


Fig. 5-23a, p. 89



© 2004 Thomson - Brooks Cole

I CORRIERI DELL'INFORMAZIONE ASTRONOMICA

Le onde elettromagnetiche

La luce visibile ... ma anche i raggi gamma, X, IR e le onde

Una teoria completa della luce, capace di rendere perfettamente conto dei fenomeni della diffrazione, dell'interferenza e della polarizzazione, apparve solo dopo la metà dell'ottocento a seguito dell'opera di Maxwell (1831–1879), il quale esprime in forma generalizzata le equazioni del campo elettromagnetico. La luce venne quindi descritta come un campo elettromagnetico variabile nel tempo che si propaga nello spazio. Le onde radio, scoperte da Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) vennero presto riconosciute essere onde elettromagnetiche, aventi frequenze molto più basse di quelle delle onde luminose.

Le equazioni di Maxwell derivano direttamente dalle quattro leggi fondamentali dell'elettromagnetismo (vedi Capitolo 3). Nel vuoto e in assenza di cariche, di correnti e di campi elettromagnetici fossili, esse possono essere scritte nella forma:

$$1) \quad \nabla \cdot E = 0$$

$$2) \quad \nabla \cdot H = 0$$

$$3) \quad \nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$4) \quad \nabla \times H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

I raggi cosmici e i neutrini

I raggi cosmici cosiddetti primari sono costituiti principalmente da nuclei atomici elettricamente carichi (ioni) dotati di energie fino a 10^{20} eV . Le misure fondamentali che si effettuano sono la determinazione della loro energia e della composizione chimica. Circa il 90% di essi sono protoni, il 9% sono particelle , l'1% nuclei piu' pesanti, e poi elettroni (circa 1%), sia positivi (positroni) che negativi.

A questi vanno aggiunte altre particelle subatomiche (neutrini, pioni, muoni etc.) e fotoni di alta energia che possono però essere prodotti dai raggi primari per interazione con l'ambiente in cui si originano, il mezzo interstellare, o l'atmosfera terrestre. La caratteristica principale di queste particelle e' la loro elevata energia. Circa una volta al secondo, arriva sulla terra una particella subatomica dotata di energia pari a quella di un sasso scagliato con forza. Naturalmente si tratta di particelle relativistiche la cui energia è superiore a quella della loro massa.

$$E = \frac{mc^2}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} \geq mc^2$$

Le sorgenti più probabili dei raggi cosmici sono le supernovae, le stelle di neutroni in rapida rotazione (pulsars), il nucleo della Galassia (che è una intensa sorgente di radiazione di sincrotrone), le radio galassie lontane, e i quasars. Prima della costruzione dei grandi acceleratori di particelle, lo studio dei raggi cosmici rappresentò l'unico banco di prova sperimentale per la fisica particellare. Sono importanti per lo studio delle esplosioni di supernova, dei nuclei e dei campi magnetici delle galassie, della composizione del mezzo interstellare (raggi secondari), e per la cosmologia in generale. I neutrini vengono prodotti dalla materia calda, e perciò, nell'epoca attuale, praticamente solo nei nuclei stellari. A causa della loro piccolissima cross section, essi interagiscono debolmente con la materia e sono perciò difficilmente rivelabili. Sono importanti per lo studio delle interazioni tra particelle di alta energia, e per lo studio delle reazioni termo-nucleari all'interno del Sole.

Le onde gravitazionali

Fu Einstein, nel 1916, a porre le basi della teoria delle onde gravitazionali, praticamente subito dopo la formulazione della relatività generale. Egli considerò e descrisse deboli onde emesse da corpi con piccola gravità che si propagavano in uno spazio-tempo piatto e vuoto. La prima cosa che notò è che, a differenza di quanto avviene con il dipolo elettrico, le onde gravitazionali erano sempre di quadrupolo. Il problema è che se una massa potesse, per ipotesi, oscillare attorno ad un punto fisso dello spazio, io misurerei a distanza una variazione del campo gravitazionale proporzionale alla massa in gioco e allo spostamento che essa effettua. Invece, siccome una massa oscillante presuppone l'esistenza di un'altra massa ad essa legata gravitazionalmente, e poiché le masse hanno, a differenza delle cariche elettriche, tutte lo stesso segno, ovvero le masse gravitazionali sono uguali a quelle inerziali, la radiazione prodotta da masse "oscillanti" è quella di quadrupolo.

In effetti, se consideriamo anche due sole masse uguali, m , distanti tra di loro $2a$, il potenziale V di un punto dello spazio posto alla distanza r dal loro baricentro avrà una espressione di quadrupolo, non di dipolo (esercizio....). L'intensità del campo decresce in questo caso con la quarta potenza. La radiazione di quadrupolo risulta perciò poco efficiente.

Una sbarra materiale, di massa M , e lunghezza l , posta in rapida rotazione, w , mostra un momento di quadrupolo variabile e la luminosità L della radiazione di quadrupolo emessa sarà

$$L = \frac{128GM^2l^4w^6}{45c^5} = \frac{128G}{45c^5} \left(\frac{M}{l}\right)^2 v^6$$

Si può verificare che nei casi pratici tale energia è sempre molto piccola. Ricordare che la velocità $v = w \times l$ non può superare la velocità del suono del materiale della sbarra (in genere, $v \approx 10^6$ cm/s).

Negli anni recenti, ce stata una importante conferma indiretta della esistenza delle onde gravitazionali ad opera di Hulse e Taylor i quali studiarono le variazioni del moto orbitale di della pulsar binaria PSR 1913 + 16. Per questo lavoro, Hulse e Taylor ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1993. Potenziali sorgenti di onde gravitazionali sono il collasso (anisotropo) di stelle massicce nelle esplosioni di supernovae, la coalescenza di stelle di neutroni in sistemi binari, i sistemi binari in genere.

Le polveri e i meteoriti

Si chiamano **meteoroidi** i frammenti di rocce e metalli che vagano per il sistema solare seguendo orbite più o meno complicate. Le loro dimensioni vanno da quelle degli asteroidi (10 Km) no a quelle dei micrometeoriti (1 mm), e a quelle dellapolvere interplanetaria (1). Quando un meteoroido colpisce l'atmosfera terrestre, l'attrito lo porta all'incandescenza e la sua scia è visibile anche ad una altezza di 120 Km (meteore, bolidi).

I meteoroidi che non bruciano completamente attraversando l'atmosfera e che cadono al suolo si chiamano meteoriti. Essi possono provocare crateri anche grandi, a seconda della loro massa. Ci sono circa 1500 meteoriti all'anno con massa superiore al Kilogrammo. Si calcola anche che ne cadano circa un milione di kilogrammi al giorno sulla Terra. Fortunatamente la probabilità di impatto decresce con l'aumentare delle dimensioni del meteoroido.

Famoso è il Meteor Crater, in Arizona, del diametro di un kilometro, formatosi circa 50000 anni fa per l'impatto di un grosso meteorite del diametro di circa 50 metri e peso di quasi un milione di tonnellate, giunto con una velocità di circa 30000 Km/s. In realtà, il meteorite deve essere esploso prima di giungere al suolo e il cratere è stato quindi creato dall'onda d'urto.

La pioggia di meteoriti sulla Terra è continua. Arrivano al suolo circa 1500 meteoriti all'anno con massa superiore al Kilogrammo, ma si calcola che ne cadano un gran numero di più piccoli, circa un milione di kilogrammi al giorno.

Quando la Terra passa attraverso una scia di meteoroidi, come quella che si forma dietro alle comete, il numero di impatti cresce improvvisamente e noi osserviamo il noto fenomeno della pioggia meteorica. Le meteore appartengono al sistema solare e perciò, in prossimità della Terra, non possono possedere velocità maggiori di quella di fuga di 42 Km/s, calcolata alla distanza della Terra dal Sole. Siccome la Terra viaggia ad una velocità di 30 Km/s, le meteore possono colpirla con velocità relative che vanno dai 12 ai 72 Km/s. In realtà sono state trovate anche meteoriti con velocità superiori ai 100 Km/s.

Si pensa che la loro origine sia extra-solare. E' facile capire che la frequenza di impatti cresce nella seconda metà della notte perché la velocità di rivoluzione della Terra si compone con quella di rotazione.

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.

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*.

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.

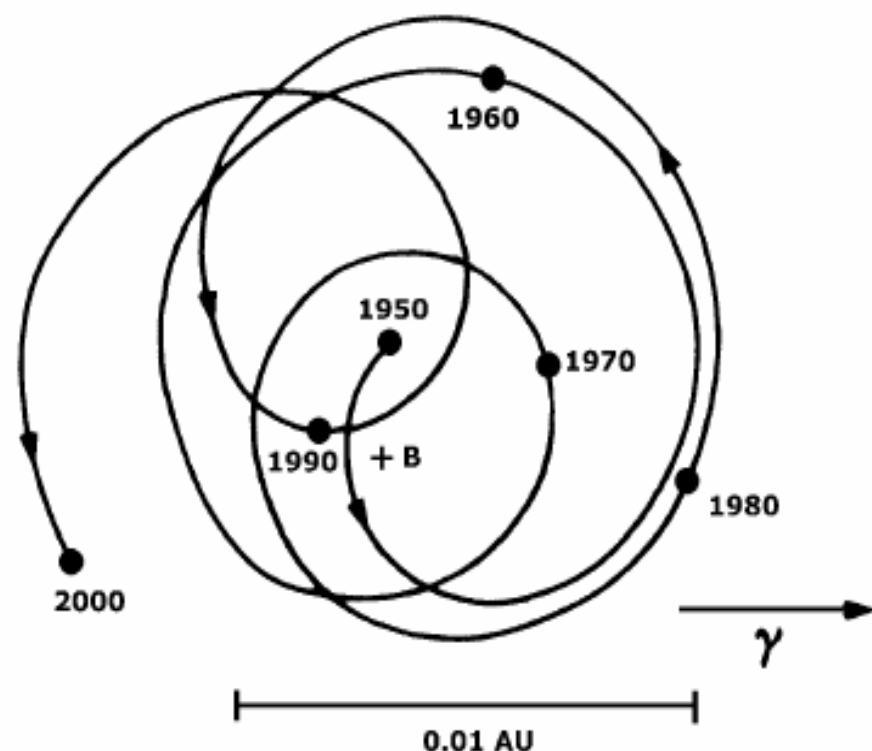
Origine del sistema di riferimento

Operativamente, l'origine di **qualunque** 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 vogliano 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 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 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 $1/3\sigma \approx 300 \text{ parsec}$.

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*.

