

Questa è la mia tesi (non ancora corretta), TROVERETE CERTAMENTE DEGLI ERRORI E MAGARI ALCUNE FRASI NON PROPRIO COMPRESIBILI. DA SOTTOLINEARE L'USO DEI SOFTWARE DIDATTICI E IL LABORATORIO DI INFORMATICA (PENSATA PER UN PNI)

Ci sono 4 UD

Gravitazione

Relatività generale

Campo elettrico

Le coniche con cabri

## **LA GRAVITAZIONE, LA RELATIVITA GENERALE E IL CAMPO ELETTRICO NEI PROGRAMMI SCOLASTICI**

L'unico programma ministeriale che ammette contemporaneamente tutte e tre le unità didattiche e dove è possibile introdurre l'uso di software è il programma del Piano Nazionale per l'Informatica. Il programma è costituito dai seguenti temi<sup>1</sup> e indichiamo solo le specifiche per ogni tema che interessano il percorso e le unità didattiche presenti in questa tesi, rimandando il lettore all'articolo citato nella nota 1 per maggiori approfondimenti.

- forze e campi;
  - campo gravitazionale e campo elettrostatico;
  - potenziale ed energia potenziale: campi conservativi;
  - moto di masse in un campo gravitazionale;
- sistemi di riferimento e relatività;
  - ipotesi della relatività generale.
- principi di conservazione - processi reversibili e irreversibili;
- onde meccaniche ed elettromagnetiche;
- struttura della materia;
- l'Universo fisico.
  - La curvatura dello spazio-tempo;
  - oggetti celesti;
  - sistema solare;

la suddivisione rispetto agli anni del triennio è la seguente

Classe terza : campo gravitazionale energia potenziale gravitazionale, campo conservativo

Classe quarta : relatività generale e ristretta

Classe quinta: l'universo fisico e curvatura spazio tempo, campo elettrico

È possibile comunque creare un percorso didattico che anticipi al terzo anno la relatività, fatta quindi in concomitanza con la legge di gravitazione universale oppure posticiparla per introdurla quando si parla dell'Universo fisico.

### **VALORE DIDATTICO DEGLI ARGOMENTI TRATATI**

Lo studio della legge di gravitazione universale "apre la mente" ed avvia alla conoscenza dell'immensamente grande, dell'Universo. Spesso, su quasi tutti i testi scolastici e non, è il primo tema della fisica in relazione al quale, appaiono immagini di galassie o di ammassi di galassie. Ci si proietta immediatamente dal contingente terrestre, fatto di piani inclinati e palline che rotolano, alle grandi dimensioni caratteristiche dell'Universo Nella mia esperienza di guida.

---

<sup>1</sup> <http://www.fisica.unige.it/pls/linea2/PNI.htm#FISICA%20PER%20IL%20TRIENNIO>

Nella mia esperienza di guida scientifica nella mostra dal “dal cielo all’Universo” ho potuto constatare che spesso (molto spesso) gli ospiti della mostra non conoscevano la differenza tra una galassia e una stella o per lo meno non riuscivano a collocare questi oggetti nel cosmo. Non c’è la percezione della dimensione o della struttura dell’Universo e questo è assolutamente trasversale rispetto all’età della popolazione. Anche dando uno sguardo agli studi condotti su campioni di popolazione studentesca e non, si evince una profonda mancanza di conoscenze del reale o per lo meno dei meccanismi che regolano la natura<sup>2</sup>. La legge di gravitazione universale o la relatività, a dispetto di molti altri temi della fisica, hanno il pregio di essere per lo meno affascinanti, il che rappresenta un punto a favore per la divulgazione scientifica e per la didattica scolastica. Nondimeno è vero che nelle aule di scuola non siamo chiamati a sponsorizzare la scienza ma ad insegnarla con tutti i problemi che ne possono scaturire. Il fatto che siamo circondati da apparecchiature tecnologiche che funzionano proprio grazie ai principi fisici che insegniamo, non implica che si sia sempre in grado di spiegarne il funzionamento. Cionondimeno è necessario sforzarsi per implementare le lezioni con monografie dedicate alla tecnologia attuale<sup>3</sup>.

## **PROBLEMATICHE E AUSILI DIDATTICI**

È sempre auspicabile una collaborazione con i colleghi insegnanti di filosofia e storia, lettere, lingue straniere, religione per creare dei percorsi multidisciplinari coerenti e razionali<sup>4</sup> nel rispetto dei singoli percorsi didattici e dei programmi ministeriali. Non si chiede però, una scuola “fisicocentrica” ma si ricorda che è possibile trovare moltissimi testi in lingua latina o greca che trattano di scienza e non di meno testi scientifici ed articoli in francese ed inglese<sup>4</sup> che raccontano le nuove scoperte, che quotidianamente avvengono lontano dagli occhi distratti della società e degli studenti. Credo insomma in una integrazione razionale delle discipline, integrazione che non può esistere senza sforzi ed impegno. È noto a tutti che ci sono delle difficoltà intrinseche nella comprensione delle materie scientifiche dettate, nel caso della matematica ad esempio, da un diverso approccio logico e soprattutto da un diverso universo simbolico, che la rende per certi versi o incomprensibile o a detta di quasi tutti gli studenti, completamente inutile. Tutti gli studenti, almeno una volta, si sono chiesti: “...ma a cosa mi serve questo?”. Trovare una risposta è abbastanza facile, solo dopo aver compiuto studi superiori, strada che sempre meno studenti vogliono intraprendere. Allora qualche volta ci si deve chiedere davvero che senso ha ciò che si fa a scuola e ciò che si insegna, e verificare se ciò che si dice ha una valenza, ha un significato e cercare quindi raccordi, nodi e legami con tutto ciò che sta intorno per non isolare una materia, da sempre relegata, nell’immaginario studentesco, nelle menti di folli scienziati. Rendere contingente la fisica e la matematica, sembrerebbe cosa assai facile se non altro per il fatto che viviamo in una società permeata dalla scienza che ne fa un uso continuo, che addirittura ne abusa, una società che però sempre più non si domanda il perché e il come della scienza e della tecnologia. Forse a causa della complicatezza della scienza e ancora più della complicatezza della tecnologia. Siamo tutti possessori di tecnologie di cui non sappiamo nulla, frutto di una raffinatezza tecnologica e scientifica, di cui ignoriamo tutto o quasi. Per un docente quindi risulta forse davvero difficile cercare di riportare al contingente dei fenomeni che necessiterebbero, per una accurata comprensione, di conoscenze che vanno ben al di sopra di quelle richieste dal titolo di studio. Con il rischio, quando ci prova, di risultare incomprensibile o peggio, inutile. Ciononostante si deve cercare di trovare una via che consenta allo studente una maggiore

---

<sup>2</sup> Vedi <http://www.polimetrica.com/download/L100318r0AttiDeIVConvegnoOpenAccess.zip> e <http://www.invalsi.it/invalsi/ricerche.php?page=nazarchivio> .

<sup>3</sup> In tal caso è utile consultare riviste scientifiche (o meglio di divulgazione scientifica) che spesso dedicano articoli per spiegare il funzionamento degli apparati tecnologici. Qualche volta può però capitare che queste riviste si prendano delle licenze che sfiorano la fantascienza.

<sup>4</sup> Ricordiamo che quasi il 100% della letteratura scientifica mondiale (Nature, Astronomy & Astrophysics, Science, etc.) parla inglese, e che spesso le traduzioni sono scarse, insoddisfacenti o in ritardo.

percezione delle cose, far comprendere che quello che si fa in classe rende capaci di capire, comprendere e si spera anche criticare ciò che ci circonda.

Per *bypassare* questo problema, che è un problema reale della scuola, l'insegnante ha a disposizione una grande quantità di strumenti didattici che possono essere utilizzati e che spesso risultano di grande efficacia. L'uso dei software o di proiezioni filmate non può che essere un ottimo supporto alle lezioni di tipo tradizionale, che rimangono insostituibili.

In questo percorso ricorrerò spesso all'uso di questi ausili didattici perché credo nella loro efficacia, nella loro interattività e praticità d'uso.

## **ANALISI CRITICA DEI TESTI E DEL MATERIALE REPERIBILE IN RETE**

### **Testi per le scuole superiori.**

#### **“Physica”, Antonio Caforio, Aldo Ferilli. Editrice Le Monnier per i licei scientifici edizione 1991**

Certamente questo testo è stato ed è tuttora (nelle nuove edizioni) tra i più utilizzati nelle scuole superiori ed in particolar modo nei licei scientifici. È un testo assai completo e spesso molto rigoroso nella presentazione dei concetti fisici. La vastità degli argomenti trattati è paragonabile in alcuni casi a ciò che si trova in testi universitari. Molti sono affezionati a questo libro di scienza proprio per la sua impostazione classica. Credo che sia un ottimo testo da adottare in un liceo scientifico con programmazione PNI o anche di ordinamento. Il vantaggio di avere un testo completo ed esauriente sta nel fatto che può lasciare al docente la libertà di scegliere cosa approfondire e cosa invece trascurare. Può essere imputata una scarsa attenzione agli esercizi che spesso sono difficoltosi e con una gradualità incostante, mentre la parte teorica è molto esauriente e ben fatta. Sono presenti molte informazioni e curiosità con schede di approfondimento e una grande quantità di immagini e grafici. Il testo dedica un capitolo intero (Volume 1, Meccanica) alla spiegazione dell'Universo fisico, del moto dei pianeti e delle leggi di Keplero e Newton, oltre a presentare il concetto di campo gravitazionale in modo semplice ed efficace. Nel terzo volume dedica i primi due capitoli, molto completi alla trattazione della legge di Coulomb e del campo elettrico, rispettivamente. In definitiva un ottimo testo da “maneggiare” con perizia.

#### **“Il mondo della fisica”, Ugo Amaldi. Editrice Zanichelli, edizione 1995**

Questo testo è ad ora tra i più utilizzati nelle scuole superiori, ne esistono diverse versioni con specifiche particolari a seconda della destinazione d'uso ed anche possibile trovare la versione modulare, composta cioè di molti tomi. La versione da me analizzata è composta da un tomo unico che quindi è utilizzato per tutto il triennio (in un liceo scientifico ad esempio). Si divide in sei sottosezioni: Meccanica, Termologia, Acustica, Ottica, Elettromagnetismo, Fisica atomica e subatomica. Anche questo testo quindi è completo e ben equilibrato nell'esposizione dei concetti, inoltre è molto più fornito, rispetto al Caforio-Ferilli, per quanto riguarda le note storiche e le curiosità. Mette a disposizione dei riassunti finali per ogni capitolo e le parole chiave e anche molte tabelle dati. Certamente completo ma carente avvolta di formule e calcoli e soprattutto di esercizi, che sono presenti a fine testo. Per il resto resta uno strumento equilibrato e ben fatto, certamente commisurato all'uso e alle conoscenze richieste in un liceo scientifico o in alcuni istituti tecnici. Il testo tratta in modo abbastanza esauriente quasi tutti gli argomenti esposti nelle unità didattiche seguenti, partendo dalla gravitazione universale Cap 9 fino al concetto di campo elettrico Cap 2-3. Manca la trattazione della relatività generale che viene appena accennata.

### **Testi universitari.**

#### **“Fisica 1”, Halliday, Resnick, Krane. Editrice Ambrosiana edizione 2001**

Testo certamente assai completo e ricco sia di contenuti che di esercizi. Si nota la carenza di immagini e grafici che potrebbero essere implementate. Tratta di tutta la meccanica partendo dalla teoria della misura fino al concetto e alla trattazione dell'entropia. La legge di gravitazione universale è trattata abbastanza tardi nel testo, nel capitolo 16, dove si accenna in un paragrafo alla teoria della relatività generale, mentre le leggi di Newton e la dinamica, sono introdotte molto prima, nel capitolo 5.

### **Testi divulgativi.**

Ho avuto l'occasione di rileggere alcuni testi di divulgazione scientifica, notando che alcuni di essi tendono a rendere eccessivamente fantasiosa l'idea dell'Universo, mentre altri, riescono ad essere chiari e contemporaneamente ad informare il lettore con dati seri e rigorosi. Molto bello a tal proposito il libro "poesia dell'Universo" che a dispetto del titolo resta un libro ben scritto. Cito in seguito alcuni testi che ritengo per lo meno interessanti e che si potrebbero consigliare a degli studenti che siano intenzionati a continuare la scoperta della conoscenza dell'Universo e della cosmologia.

"Nuove frontiere, le ultime scoperte sulla vita, la Terra, lo spazio e L'Universo", Isaac & Janet Asimov. Editrice Mondadori, Oscar Saggi Mondadori, edizione 1998

"Cosmologia Moderna", Dennis W. Sciama. Editrice Mondadori, Oscar Saggi Mondadori, edizione 1999

"Poesia dell'Universo, l'esplorazione matematica del cosmo", Robert Osserman. Editrice Longanesi & C. La lente di Galileo.

"Buchi neri e universi neonati", Stephen Hawking. Editrice BUR, SuperBur Scienza

### **La rete e le sue informazioni**

Se è vero che la "rete" offre grandi quantità di dati, è plausibile, se non certo, che almeno statisticamente alcune di queste informazioni siano imprecise o addirittura sbagliate. Ecco perché è sempre auspicabile che ogni lezione che venga fatta a scuola, venga conclusa con una serie di siti o testi o informazioni che l'insegnante deve dare per indirizzare lo studente ad una operazione di ricerca individuale ma nella giusta direzione e soprattutto evitando così la possibilità che si studino informazioni scorrette.

La sitografia specifica che ho utilizzato in questa tesi, ritengo abbia questi requisiti.

### **Individuazione della scuola e dei destinatari**

Come già detto in precedenza questo elaborato intende affrontare dei temi di fisica che ritengo possano essere insegnati in un liceo scientifico con programmazione PNI. I temi qui esposti sono affrontati nel corso del terzo, quarto e quinto anno, attraversando trasversalmente tutto il secondo biennio. È stato scelto un liceo con ordinamento PNI perché è l'unico che lascia ampio spazio alla trattazione della legge di gravitazione universale e della relatività generale, oltre alla possibilità di introdurre nel percorso didattico l'uso dei software.

Vediamo adesso l'orario previsto in un liceo scientifico con ordinamento PNI

#### **Orario:**

Orario previsto delle lezioni in un Liceo scientifico PNI

MATERIA	I	II	III	IV	V	Totale
Fisica	-	-	2	3	3	8
Matematica ed Informatica	5	5	5	5	5	25

**TEMI P.N.I. (Piano Nazionale per l'Informatica)**

Classe terza : campo gravitazionale energia potenziale gravitazionale, campo conservativo

Classe quarta : relatività generale e ristretta

Classe quinta: l'universo fisico e curvatura spazio tempo, campo elettrico

**CAMPO GRAVITAZIONALE e  
LEGGE DI GRAVITAZIONE UNIVERSALE**

**UNITÁ DIDATTICA 1**

**ANNO 2007/2008**

---



## **UNITÁ DIDATTICA 1 : LEGGE DI GRAVITAZIONE UNIVERSALE**

### **Prerequisiti:**

È necessario possedere i seguenti requisiti

- Moto di un punto
- Sistemi di riferimento inerziali e non inerziali
- Grandezza vettoriale e scalare
- Moto rettilineo uniforme, accelerato, circolare e circolare uniforme
- Centro di massa e centro di forze applicate ad un sistema semplice
- Le tre leggi di Newton
- Equilibrio dei corpi rigidi
- Energia potenziale

### **Obiettivi generali:**

- Acquisire le conoscenze, competenze e capacità previste dalle unità didattiche
- Affinare le capacità logiche e di comprensione dei fenomeni celesti
- procedimenti di astrazione
- ragionare induttivamente e deduttivamente
- comprendere l'importanza storica che il concetto di forza di gravità ha portato nella società scientifica e non scientifica
- comprensione della legge di gravitazione universale
- utilizzo almeno parziale dei software didattici presentati

**Obiettivi trasversali:**

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi.
- Proseguire ed ampliare il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti
- Contribuire a sviluppare lo spirito critico e l'attitudine a riesaminare criticamente ed a sistemare logicamente le conoscenze acquisite.
- Contribuire a sviluppare capacità logiche ed argomentative
- Acquisire abilità di studio.
- Comunicare in modo efficace

**Obiettivi specifici:**

**Conoscenze:**

- Conoscere la storia dell'evoluzione del pensiero scientifico dopo le prime formulazioni delle leggi sulla gravità
- Conoscere come queste teorie hanno rivoluzionato la società antica e contemporanea
- Conoscere la legge di gravitazione universale
- Conoscere le leggi di Keplero
- Conoscere le interazioni dei corpi celesti Terra – Luna – Sole e loro principali fenomeni
- Conoscere le applicazioni tecnologiche legate alle nozioni che si sono apprese in questa unità didattica

**Competenze:**

- Saper spiegare come nasce la formulazione della legge di gravitazione universale
- Saper spiegare la legge di gravitazione universale
- Saper enunciare le leggi di Keplero

**Capacità:**

- saper comprendere il perché del moto degli oggetti in un sistema di masse
- Riuscire a fare una lezione dinamica utilizzando il software StarryNight® Pro spiegando il moto dei pianeti le forze che interagiscono tra di essi e la teoria appresa in questa unità didattica

**Contenuti:**

- Introduzione

- Cenni sull'evoluzione dell'astronomia
- Breve storia dello studio della gravità sulla Terra
- Newton, una mela e la legge di gravitazione universale
- Leggi di Keplero
- Energia potenziale gravitazionale
- Leggi di Newton e teoria della relatività generale
- Laboratorio virtuale di fisica (vedi in allegato B)
- Laboratorio di fisica on-line (vedi in allegato B)

#### **Strumenti utilizzati:**

- Libro di testo
- Dispense
- Lavagna e gesso
- Software didattico ( Excel<sup>®</sup>, Starry Night<sup>®</sup> Pro ,Cabri Géomètre Plus)
- Laboratorio di fisica on-line
- Auspicabile visita d'istruzione in un planetario od osservatorio astronomico
- Video e documentari (National Geographic, PSSC, Ulisse, SuperQuark, etc)

#### **Tempi dell'intervento didattico**

Sono previste circa 8 ore comprese le 2 necessarie per il laboratorio e la visione di due filmati. Considerando che le ore di lezione nel terzo anno per la fisica sono 2, l'argomento può essere esaurito in 4 settimane.

#### **Metodologia:**

La legge di gravitazione universale è argomento affascinante, povero di formule e dimostrazioni. I calcoli che sfruttano le poche relazioni spiegate qui, si riducono a moltiplicazioni e divisioni, ecco perché credo si debba stimolare più che il calcolo, il ragionamento fisico.

Lo svolgimento dell'attività didattica avverrà attraverso lezioni dialogate e interattive, con auspicabili osservazioni, domande flash poste ai singoli alunni. È previsto lo svolgimento in itinere di esercizi utili all'apprendimento di quanto spiegato durante le ore di lezione. È fondamentale che ogni qual volta si presenti la necessità di richiamare concetti che sono stati già spiegati, vengano richiesti agli alunni. Non dare mai per scontato ciò che si è spiegato le volte precedenti. L'approccio storico è un buon modo (soprattutto su argomenti che generano fascino come questo) per introdurre l'argomento. L'uso di software è consigliabile per la loro grande capacità di interattività ed immediatezza. Inoltre può essere utile l'ausilio di video o documentari che hanno un grande impatto scenico, quindi stimolano interesse e curiosità.

### **Verifica e valutazione:**

La fase di *verifica e valutazione* è parte integrante del processo educativo e permette di monitorare sia il raggiungimento degli obiettivi prefissati, sia l'efficacia della strategia didattica attuata.

#### **Le modalità principali di verifica sono:**

- domande e risposte dal banco
- verifiche scritte
- lezione simulata da parte dei ragazzi o tesina su di un particolare aspetto

#### **Attività di recupero:**

- Recupero da effettuare in classe durante le ore curricolari, riprendendo i concetti non ben compresi e svolgendo esercizi che riguardino gli argomenti trattati
- Assegnazione al singolo studente di tesine mirate.

## **CONTENUTI**

### **Introduzione:**

La scienza che individuiamo con il termine astronomia è in realtà un'abbastanza recente, è una sezione della fisica che si occupa degli "oggetti" che si evolvono nell'Universo. L'astronomia nasce come scienza osservativa comune a quasi tutti le grandi civiltà dell'antichità, cresciuta poi in modo esponenziale solo dopo l'evoluzione della tecnologia (telescopi, spettrografi, satelliti, etc.).

Partiamo da questa particolare scienza per affrontare un percorso che ha interessato quasi tutta la storia dell'attività umana per arrivare poi alla formulazione della legge di gravitazione universale. Per comodità oltre che per ragioni storiche, questa legge sulla Terra la chiamiamo semplicemente gravità. Conosciamo bene il valore dell'accelerazione che ogni corpo dotato di massa subisce in prossimità della superficie terrestre, questo valore è pari a  $9,822 \text{ m/s}^2$ . Sappiamo inoltre che l'accelerazione è un vettore e che quindi ha

un modulo, un verso e una direzione. Infatti questa accelerazione ha *verso* diretto verso il centro di massa del pianeta e direzione ortogonale alla superficie. Per quanto questa non sia una definizione corretta né di forza di gravità né di legge della gravitazione, per adesso basti capire che il valore dell'accelerazione di gravità sulla Terra deriva (e poi calcoleremo) direttamente dalla legge di gravitazione universale.

### **Cenni sull'evoluzione dell'astronomia:**

Una breve introduzione alla storia della astronomia serve per avere un quadro un po' più completo e per comprendere meglio l'impatto che le valutazioni dell'uomo hanno avuto circa lo studio della volta celeste e dell'Universo.

L'osservazione del cielo è stata sempre di grande importanza per tutte le civiltà del pianeta che in epoche diverse hanno cercato di interpretare quel che accadeva sopra le loro teste, sfruttando la ciclicità dei fenomeni e interpretandone il significato. L'astronomia moderna ha avuto ufficialmente inizio<sup>5</sup> nel 1600 soprattutto grazie all'impulso dato da Galileo Galilei. In realtà non vi è una demarcazione netta tra un'astronomia antica e una moderna, basti pensare ad astronomi come Nicolò Copernico 1473-1543 (che sviluppa la teoria del sistema eliocentrico) che porta alla cosiddetta rivoluzione copernicana o anche Tycho Brahe e Giovanni Keplero. Infatti a loro modo tutti questi scienziati e molti prima di loro contribuirono con gli studi condotti, formularono teorie nuove e sempre più corrette per interpretare i fenomeni celesti. Capire che gli oggetti che si vedevano proiettati sulla volta celeste avessero una distanza (Galileo) oltre che una estensione, e che si muovessero con orbite ellittiche (Keplero) intorno ad una stella (Copernico), poneva fondamentali domande sul perché si osservavano quegli oggetti e quali erano le forze e le leggi che regolamentavano i loro moti. In realtà pochi anni dopo, alcune di queste domande trovarono una giustificazione ragionevole e abbastanza soddisfacente. La teoria della gravitazione universale fu formulata dal matematico e fisico inglese Isaac Newton che pubblicò "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*" nel 1687 che conteneva tra l'altro le leggi della dinamica con le quali spiegò le leggi di Keplero circa il moto dei pianeti.

Non credo che si possa conoscere la persona che per la prima volta si sia chiesto o chiesta "come mai sono appoggiato sul suolo della Terra? Cosa mi trattiene saldamente limitato al terreno?". Isaac Newton formulò una teoria che potesse spiegare il perché di questa domanda. L'opera più influente di Newton fu senza dubbio, per i successivi duecento anni, il più valido ed attendibile testo scientifico. Per la prima volta la meccanica viene trattata in modo sistematico e matematico. Nei "*Principia*" Newton tratta lo spazio e il tempo come enti assoluti ma, come già aveva fatto Galilei,<sup>6</sup> riconosce in una certa misura la relatività del moto, intesa come relativismo rispetto a un sistema di riferimento. Gli studi condotti portano Newton a

---

<sup>5</sup> Questa è certamente una convenzione, dovuta all'utilizzo del telescopio da parte di Galileo Galilei che nei primi anni del 1600 condusse approfondite osservazioni della volta celeste e studi scientifici sul moto dei pianeti del cielo e sulle proprietà cicliche delle stagioni e delle fasi lunari.

<sup>6</sup> Ricordiamo l'esperimento dei campanelli fatto da Galilei, per dimostrare la forza che attrae i corpi al suolo è proporzionale ad una accelerazione.

definire la cosiddetta legge dell'inverso del quadrato, che si può sintetizzare matematicamente in questo modo

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

C'è da aggiungere che la costante  $k$  e le considerazioni sulle masse non furono immediate. Le tre leggi della dinamica e la legge dell'inverso del quadrato aprirono la strada a quasi tutte le scoperte della fisica moderna.

Questa legge cosa ci dice? afferma che la forza  $F$  (è un vettore) che interagisce tra due masse qualunque  $m_1$  ed  $m_2$  è direttamente proporzionale ad una costante  $k$ , al prodotto delle due masse ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza che intercorre tra le masse stesse. Bisogna fare una serie opportune considerazioni. La forza è applicata in ugual misura a tutti e due i corpi ma in verso opposto lungo la loro congiungente.

La costante  $k$  che più comunemente è individuata dalla lettera  $G$  non fu trovata da Newton con precisione infatti si basava più su osservazioni e queste nel 1700 non potevano essere certo accurate come quelle che oggi permettono di verificare che

$$G = (6,67428 \pm 0,0007) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Come detto questo è il valore sperimentale della costante di gravitazione universale, essa non dipende né dalle proprietà dei corpi che si attraggono, né dalla loro posizione. Il valore di questa costante fu misurato per la prima volta dal fisico inglese Henry Cavendish nel 1798 per mezzo di una bilancia di torsione<sup>7</sup>. Dal punto di vista operativo, essa si può definire come l'intensità della forza di interazione tra due corpi a simmetria centrale, ciascuno di massa pari a 1 kg e posti a distanza di 1 m l'uno dall'altro.

Come abbiamo detto il valore dell'accelerazione di gravità sulla Terra che indichiamo con la lettera  $g$  deriva direttamente dalla formula vista prima. Infatti basta inserire nella formula i valori della massa della Terra e il valore del raggio medio per ottenere proprio il noto valore di  $9,822 \text{ m/s}^2$ .

Con i dati in possesso quindi è possibile calcolare la massa della Terra e quindi tramite la formula della gravitazione universale e del valore di  $G$  è possibile calcolare il valore numerico di  $g$ . Come vediamo dai valori sopracitati il raggio medio della Terra ai poli è circa 21 km più piccolo di quello all'equatore. Questo quindi vuol dire che se si misura il valore di  $g$  ai poli si otterrà un valore maggiore rispetto a quello ottenuto all'equatore, il che è come dire che una massa di 1 kg pesato in Italia è più pesante in Groenlandia e più leggero in Mauritania. Infatti è proprio così. Il peso di un oggetto dipende da quanto è accelerato dalla Terra

---

<sup>7</sup> L'esperimento condotto da Cavendish è spiegato nell'appendice A dell'allegato B

e questo non è da confondersi con la massa dell'oggetto che ovviamente non cambierà. Infatti convenzionalmente chiamiamo peso la forza con cui siamo attratti dalla Terra confondendola purtroppo con la massa.

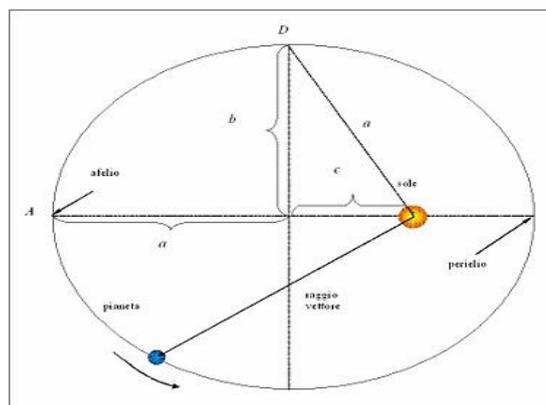
Se il signor Mario afferma di pesare 89 kg in realtà vuole dire che è attratto verso il centro di massa della Terra con una forza pari a circa  $9,8 \text{ m/s}^2 \times 89 \text{ kg} = 872,2 \text{ N}$ . quindi possiamo dire che se ci pesiamo su una bilancia elettronica, ad esempio, la bilancia misurerà la nostra forza peso in newton e la dividerà automaticamente per 9,8. Ma se il signor Mario si pesa con la stessa bilancia al polo nord e la sua massa non è cambiata allora la bilancia misurerà un valore pari a  $9,84 \times 89 \text{ kg} = 875,76 \text{ N}$  che dividerà (a causa della sua taratura<sup>8</sup>) per il valore 9,8, sul display apparirà un "peso" pari a 89,36. Quindi come abbiamo verificato, pesarsi con una bilancia non significa conoscere la propria massa. Il signor Mario non essendo un fisico sarà convinto di essere ingrassato di 360 grammi e non riuscirà a capire perché.

### **Le Leggi di Keplero e la legge di gravitazione universale.**

Keplero, come già si è detto in precedenza, ha il merito di aver formulato tre leggi passate poi alla storia come le prime leggi sul moto dei pianeti dedotte per via meccanica. Osservando il moto dei pianeti, le posizioni e la loro periodicità ed interpolando questi dati con la matematica enunciò le seguenti leggi.

#### ***Prima legge di Keplero (forma delle orbite)***

***Le orbite dei pianeti intorno al Sole sono degli ellissi di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.***



Questa legge afferma quindi, contrariamente a quanto prima si credeva che i pianeti nel loro modo di rivoluzione intorno al Sole compiono orbite ellittiche e non circolari. L'ellisse è una figura piana particolare

---

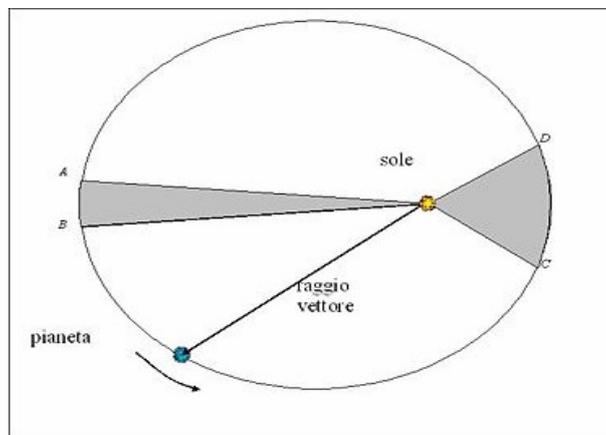
<sup>8</sup> Le bilance elettroniche che si usano oramai dappertutto hanno un sistema di calcolo abbastanza sofisticato che sfrutta una cella di carico. La cella di carico è costituita da un oggetto metallico che si deforma a causa del peso. L'allungamento o la compressione fa sì che la resistenza elettrica del corpo metallico vari, convertendo la variazione di resistenza in forza e dividendo poi per il valore medio dell'accelerazione di gravità, la bilancia restituisce un valore in unità di massa.

e si definisce come il luogo geometrico dei punti tali che la somma delle distanze dai fuochi è costante. Aggiungiamo che il parametro fondamentale dell'ellisse è la sua eccentricità, definita come il rapporto tra la semidistanza focale e il semiasse maggiore. L'eccentricità ci dice quanto è schiacciata l'ellisse. C'è da tenere presente che le orbite dei pianeti hanno una eccentricità molto piccola dell'ordine di  $e = 0,1-0,01$  il che implica che sono quasi delle circonferenze.

***Seconda legge di Keplero (legge delle aree)***

***Il raggio vettore che congiunge il Sole con il pianeta spazza aree uguali in tempi uguali***

Questa legge è di grande interesse proprio perché riferita alla velocità dei pianeti che quindi, quando sono più vicini (perielio)<sup>9</sup> al Sole hanno una velocità maggiore rispetto a quando sono più lontani da esso (afelio).



***Terza legge di Keplero (legge della costante di rivoluzione)***

***Il rapporto tra il cubo del raggio dell'orbita e il quadrato del periodo di rivoluzione è costante per tutti i pianeti.***

Questa legge è forse quella che meno si ricorda delle tre, ma che in realtà è di grandissima importanza, infatti proprio da questa è possibile ricavare la legge dell'inverso del quadrato vista prima, ed è questa che Newton ha confermato con la sua teoria della gravitazione universale. Inoltre questa legge spiega il moto differenziale degli anelli di Saturno o delle galassie a spirale ed ellittiche<sup>10</sup>.

$$\frac{R^3}{T^2} = \text{costante}$$

<sup>9</sup> Ricordiamo: periastro, perigeo, etc.

<sup>10</sup> Bisogna ovviamente apportare alcuni cambiamenti, ma in linea di massima Keplero ha dato un forte impulso allo studio del moto dei corpi.

R rappresenta il distanza media tra il Sole e il pianeta , mentre T è il periodo orbitale, ossia il tempo necessario al pianeta per percorrere un orbita completa intorno al Sole<sup>11</sup>.

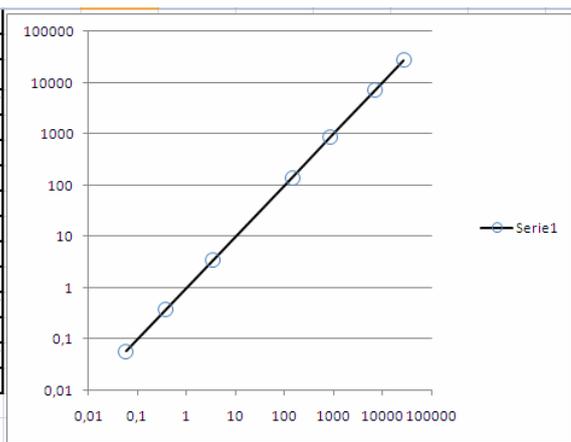
### Esercizio

Quanto vale il periodo orbitale di Giove?

### Esercizio

Verificare la terza legge di Keplero utilizzando i valori orbitali e le distanze dei pianeti del sistema orbitale, con l'ausilio di un foglio di calcolo e dell'appendice 2.

Pianeta	Mercurio	Venere	Marte	Giove	Saturno	Urano	Nettuno
Massa	0,0553	0,815	0,107	317,8	95,2	14,5	17,1
Diametro	0,383	0,949	0,533	11,21	9,45	4,01	3,88
Densità	0,984	0,951	0,713	0,24	0,125	0,23	0,297
Gravità	0,378	0,907	0,377	2,36	0,916	0,889	1,12
Velocità di fuga	0,384	0,926	0,45	5,32	3,17	1,9	2,1
Rotazione	58,8	-244	1,03	0,415	0,445	-0,72	0,673
Giorno	175,9	116,8	1,03	0,414	0,444	0,718	0,671
Distanza dal Sole	0,387	0,723	1,52	5,2	9,58	19,2	30,05
Perielio	0,313	0,731	1,41	5,03	9,2	18,64	30,22
Afelio	0,459	0,716	1,64	5,37	9,96	19,75	29,89
Periodo orbitale	0,241	0,615	1,88	11,9	29,4	83,7	163,7
Velocità orbitale	1,61	1,18	0,81	0,439	0,325	0,229	0,182
Eccentricità	12,3	0,401	5,6	2,93	3,38	2,74	0,677
Satelliti	0	0	2	63	56	27	13
r <sup>3</sup>	0,057961	0,377933	3,511808	140,608	879,2179	7077,888	27135,23
T <sup>2</sup>	0,058081	0,378225	3,5344	141,61	864,36	7005,69	26797,69



### Energia potenziale gravitazionale:

Quando si è parlato di energia potenziale gravitazionale abbiamo considerato casi fisici che si riferivano alla Terra e in cui la variazione di altezza tra il punto di elevazione massima e quello in cui consideravamo l'energia potenziale nulla, era piccola, piccola abbastanza da considerare l'accelerazione di gravità costante. La formula che si usa in questi casi è  $\Delta U = U_b - U_a = -L_{ab}$  ovvero : la variazione di energia potenziale è uguale al lavoro compiuto per spostare un corpo dotato di massa dal punto *a* al punto *b*. Si sa bene che il lavoro è lo stesso attraverso qualsiasi percorso e che questa proprietà è vera nel campo gravitazionale perché è un campo conservativo. Quindi per convenzione si sceglie come valore massimo dell'energia potenziale il valore dato dal prodotto della massa del corpo per il valore costante dell'accelerazione di gravità per l'altezza dell'oggetto dal suolo, ovvero :  $mgh$

<sup>11</sup> Per la Terra ad esempio T vale circa 365 giorni. Vedi appendice

Lo spostamento da un punto ad un altro di una massa o un punto materiale, può essere diviso in intervalli di grandezza finita ma piccoli a piacere<sup>12</sup>. Calcolare il lavoro fatto nei singoli intervalli e sommare i lavori, significa trovare il lavoro totale fatto lungo tutto lo spostamento. Se il lavoro come sappiamo è sempre dato dal prodotto di una forza per uno spostamento allora possiamo scrivere

$$\Delta L = G \frac{M_a M_b}{r^2} (r_a - r_1)$$

È possibile approssimare  $r^2$  con la media geometrica  $r_1 r_a$ , questo perché il valore di  $r_1 r_a$  è piccolo, essendo gli intervalli piccoli, si potrà quindi riscrivere il tutto come

$$\Delta L = G \frac{M_a M_b}{r^2} (r_a - r_1) = G \frac{M_a M_b}{r_a r_1} (r_a - r_1) = G M_a M_b \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_a} \right) \dots$$

Se questo rappresenta il lavoro fatto per spostare una massa  $m$  dal punto più lontano  $r_a$  al punto un po' più vicino  $r_1$  ed eseguendo il calcolo per tutti gli intervalli successivi fino a giungere nel punto  $r_b$ , prossimo sommare tutti i contributi ottenendo la stessa formula vista prima ottenuta con l'ausilio dell'integrale.

Bisogna fare alcune considerazioni. Sappiamo che il lavoro è uguale alla variazione di energia potenziale, vediamo quindi che  $U(r) = -GM_a M_b / r$ . Inoltre si nota che il segno meno indica che il potenziale è sempre negativo e al più uguale a zero se la distanza tra le parti è infinita<sup>13</sup>. La formula non ci dice se è il corpo  $a$  che si avvicina al corpo  $b$  o viceversa, questo vuol dire quindi che può accadere che il primo si avvicini al secondo o che si muovano entrambi l'uno verso l'altro se non sono vincolati. Inoltre deve essere chiaro che sui corpi non deve agire nessun'altra forza, quindi per dirla "alla newtoniana" i corpi devono essere in quiete. Bisogna anche sapere che l'energia potenziale gravitazionale dipende dall'inverso di  $r$  e quindi se la distanza tende a infinito l'energia si annulla mentre sarà massima (in valore assoluto) quando i centri di massa dei due

---

<sup>12</sup> Il significato di "piccolo a piacere" ha valenza diversa a seconda che ci si trovi in ambito matematico o fisico, questo perché, se in matematica le grandezze possono essere prese piccole tendendo all'infinitamente piccolo, in fisica questo può non avere senso operativo. Infatti in fisica lo sperimentatore ha a disposizione corpi o grandezze finite, di dimensioni determinate e a maggior ragione, quando si parla di fenomeni macroscopici, ha poco senso far tendere all'infinitamente piccolo il valore di una massa o di una distanza. Quindi in fisica, per "piccolo a piacere" intenderemo una grandezza opportunamente piccola.

<sup>13</sup> Il fatto che la forza gravitazionale è sempre di tipo attrattivo dipende proprio dal fatto che il potenziale gravitazionale è sempre negativo. Nel caso del campo elettrico si vedrà che il potenziale può essere sia positivo che negativo a seconda del segno delle cariche in gioco. Si può infine dire che una massa posta nello spazio crea sempre una buca di potenziale, che è quella che si disegna "artisticamente" con la griglia deformata. Nel caso del potenziale elettrico invece le cariche possono creare o buche o barriere di potenziale.

corpi sono sovrapposti<sup>14</sup>. Il segno meno indica che l'energia è sempre negativa, qualsiasi sia la distanza tra i corpi e che diminuisce (in valore assoluto) al diminuire della distanza.

### **Software per la didattica:**

L'utilizzo di software didattici è sempre auspicabile quando si ha a che fare con esperimenti, che riguardano la fisica, tanto più che spesso possono rappresentare un ottimo ponte di raccordo tra la matematica e la fisica stessa. Qui presento solo alcuni dei software didattici, quelli che più comunemente sono utilizzati e che quindi offrono, tra le altre cose anche, una vastissima sitografia dedicata con manuali esercizi e macro già compilate, che all'occorrenza possono essere modificate ed adattate alle proprie esigenze.

Alcuni di questi software o comunque quelli più utilizzati sono coperti da CopyRight, quindi necessitano di licenza a pagamento, anche se alcuni di questi possono essere utilizzati nella versione trial, ossia una versione limitata o nelle funzioni o nel tempo. È possibile in alcuni casi chiedere delle licenze agevolate per coloro che si trovano in ambito scolastico e che quindi per motivi didattici vogliono usufruire di particolari convenzioni.

Questi software sono spesso capaci di affrontare i diversissimi problemi della didattica tradizionale grazie alla loro flessibile interattività. È possibile infatti comporre delle costruzioni o disegnare funzioni e poi dinamicamente osservare il loro comportamento sottolineando alcune caratteristiche che spesso con l'uso di lavagna e gesso non è possibile fare.

Si possono utilizzare in primo luogo dei fogli elettronici che spesso sono alla portata di tutti (essendo all'interno di pacchetti standard per tutti i sistemi operativi<sup>15</sup>) e che spesso vengono sottovalutati per la loro versatilità ed efficacia. Con una semplice ricerca in rete è possibile scaricare applet o piccoli software che trattano argomenti che abbracciano tutta la fisica e la matematica. In definitiva si può dire che i software sono sempre un ottimo strumento didattico e potente mezzo per far comprendere visivamente e in modo operativo quali sono i fenomeni che si stanno studiando. Questi software, spesso sono dei simulatori che utilizzando le leggi della fisica e che restituiscono visivamente, grafici, simulazioni dinamiche e quant'altro, sui quali poi è possibile fare delle considerazioni assai convincenti. Ho utilizzato i software Gravitorium e Gravity Simulator nella versione Trial, i quali sono di facile utilizzo e hanno una buona grafica.

---

<sup>14</sup> Questa ovviamente è una condizione ideale, perché non esistono corpi realmente puntiformi.

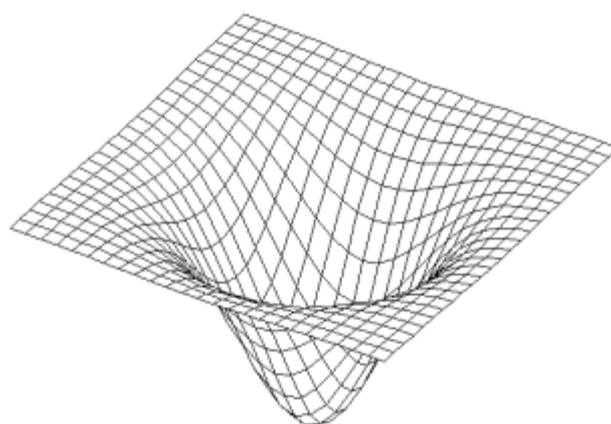
<sup>15</sup> Vedi ad esempio Office Microsoft oppure OpenOffice di Linux.

CENNI DI  
RELATIVITÀ GENERALE

UNITÀ DIDATTICA 2

ANNO 2007/2008

---



## **UNITÁ DIDATTICA 2: CENNI DI RELATIVITÁ GENERALE**

### **Prerequisiti:**

È necessario possedere i seguenti requisiti

- Moto di un punto
- Sistemi di riferimento inerziali e non inerziali
- Velocità e accelerazione come grandezze vettoriali e scalari
- Moto rettilineo uniforme ed uniformemente accelerato
- Centro di massa e centro di forze applicate ad un sistema semplice
- Equilibrio dei corpi rigidi
- Legge della gravitazione universale
- Leggi di Keplero
- Energia potenziale

### **Obiettivi generali:**

- Acquisire le conoscenze, competenze e capacità previste dalla unità didattica
- Affinare le capacità logiche e di comprensione dei fenomeni celesti
- procedimenti di astrazione
- ragionare induttivamente e deduttivamente
- comprendere l'importanza storica che il concetto di relatività ha portato nella società scientifica e non scientifica
- comprensione della legge di gravitazione universale in funzione dei concetti esposti in questa UD
- utilizzo almeno parziale dei software didattici presentati

### **Obiettivi trasversali:**

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi.
- Proseguire ed ampliare il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti
- Contribuire a sviluppare lo spirito critico e l'attitudine a riesaminare criticamente ed a sistemare logicamente le conoscenze acquisite.
- Contribuire a sviluppare capacità logiche ed argomentative
- Acquisire abilità di studio.
- Comunicare in modo efficace

### **Obiettivi specifici:**

#### **Conoscenze:**

- Conoscere la storia dell'evoluzione del pensiero scientifico dopo le prime formulazioni sulla teoria della relatività generale
- Conoscere come queste teorie hanno rivoluzionato la società moderna
- Conoscere la teoria della relatività generale
- Conoscere le interazioni dei corpi celesti in funzione dei concetti acquisiti durante lo svolgimento dell'unità didattica
- Conoscere le applicazioni tecnologiche legate alle nozioni che si sono apprese in questa unità didattica

**Competenze:**

- Saper spiegare come nasce la formulazione della teoria della relatività
- Saper spiegare quale è stata la prima conferma della teoria di Einstein

**Capacità:**

- Saper comprendere il perché del moto degli oggetti in un sistema di masse

**Contenuti:**

- Introduzione
- Accenni alla teoria della relatività generale
- La curvatura spazio-tempo
- Barriera o buca di potenziale come deformazione dello spazio
- Punti lagrangiani
- Buchi neri e relatività
- La tecnologia e la relatività

**Strumenti utilizzati:**

- Libro di testo
- Dispense
- Lavagna e gesso
- Software didattico (Gravitation)
- Auspicabile visita d'istruzione in un planetario od osservatorio astronomico
- Video e documentari (National Geographic, PSSC, Ulisse, SuperQuark, etc)

**Tempi dell'intervento didattico**

Sono previste circa 5 ore compresa 1 necessaria per la visione di un filmato ed 1 necessaria per riprendere alcuni concetti utili alla comprensione dell'argomento. L'argomento può essere esaurito in 2 settimane.

**Metodologia:**

La relatività generale è argomento che spesso viene trattato solo marginalmente anche perché risulta spesso difficile da capire e necessita di un formalismo matematico assai complesso. È ovvio che il formalismo matematico necessario non può essere introdotto in un quinto anno PNI poiché esula dai programmi

ministeriali, tantomeno negli anni precedenti. Si cerca di spiegare questo argomento con esempi ed analogie, cercando di arrivare almeno ad una comprensione intuitiva ed approssimata di ciò che è la relatività generale.

È sempre auspicabile un approccio di tipo storico cercando di trovare aneddoti interessanti sia sugli esperimenti che sugli sperimentatori. Ci si può fare aiutare da dei filmati che in modo anche spettacolare riescono a far visualizzare cose che sono difficili da astrarre da un disegno o da una lezione dialogica. Bisogna però fare attenzione a quali filmati si propongono, perché spesso sono ricchi di inesattezze e spettacolarizzazioni scientifiche di dubbia scientificità.

### **Verifica e valutazione:**

Una verifica dell'apprendimento per quanto riguarda questo argomento è di difficile attuazione. Ritengo che si possano inserire alcune domande a risposta multipla su definizioni ed aneddoti, in verifiche che trattino però anche altro. Sicuramente qualche domanda in itinere è consigliabile per una verifica costante del proprio insegnamento e dell'apprendimento degli studenti.

#### **Le modalità principali di verifica sono:**

- domande e risposte in classe
- verifica scritta (anche non specificatamente dedicata)
- lezione simulata da parte dei ragazzi o tesina su di un particolare aspetto

#### **Attività di recupero:**

- Recupero da effettuare in classe durante le ore curricolari, attraverso la ripresa dei concetti non ben compresi e lo svolgimento di esercizi riguardanti tali argomenti
- Assegnazione a singolo studente di tesine mirate.

## CONTENUTI

### Premessa

È bene dedicare circa un'ora al riepilogo delle lezioni fatte sulla teoria della gravitazione universale, richiamando concetti come , barriera e buca di potenziale, legge dell'inverso del quadrato, moto dei pianeti intorno al sole e le leggi di Keplero, ovvero quasi tutto quello che è contenuto nell'UD numero 1. In questo modo si può cercare di inserire i concetti della relatività generale in continuità con quelli della meccanica newtoniana.

### Teoria della relatività generale e curvatura dello spazio-tempo

Fino a questo momento abbiamo trattato la teoria della gravitazione utilizzando la meccanica classica e osservando che essa spiega bene il moto degli oggetti dotati di massa che interagiscono tra loro. Abbiamo visto che la legge dell'inverso del quadrato è utile per il calcolo dinamico (forze e spostamento) su diversa scala, infatti è possibile calcolare la forza che interagisce tra una mela e la Terra , tra la Terra e il Sole, tra Sole e altre stelle, tra stelle e galassia, tra galassie e ammassi di galassie. Insomma si riesce a spiegare l'interazione gravitazionale da  $10^{-3}$  fino a  $10^{25}$  metri<sup>16</sup>. Al disotto di questo *range* le forze elettriche diventano troppo importanti e non possono essere trascurate e quindi si interviene con calcoli che richiedono la teoria elettrostatica e la meccanica quantistica.

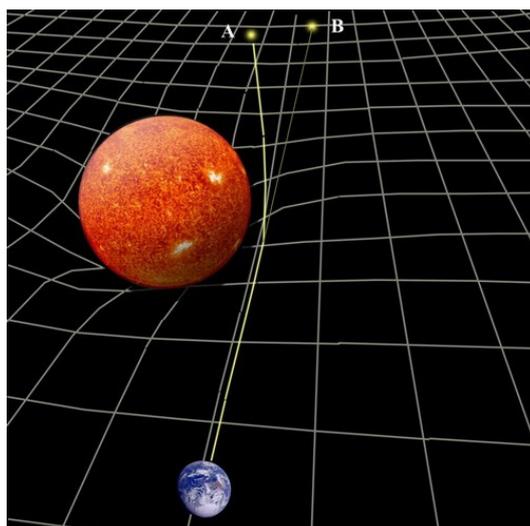
Dobbiamo farci una domanda fondamentale: Come si genera l'interazione gravitazionale?

La risposta non è immediata ne di semplice formulazione, infatti basti pensare che l'intera comunità scientifica mondiale ha dubitato a lungo prima di accettarla. In questo paragrafo cerchiamo di darne una formulazione semplice, astenendoci ovviamente dal rigore e dal formalismo matematico che sono necessari solo per studi di fisica superiore.

Nel 1916 Albert Einstein propone un nuovo modo di interpretare il mondo fisico spiegando che la materia è legata allo spazio e che la presenza della materia modifica tutto ciò che le sta intorno, ovvero sia lo spazio che il tempo. In particolare Einstein affermava che la materia modifica la geometria dello spazio il quale si incurva. La curvatura dello spazio è il punto centrale della relatività generale, la quale detta delle "regole" per calcolare le traiettorie e i moti di oggetti massivi nello spazio e le correzioni da apportare in loro presenza. L'analogia più utilizzata è certamente maggiormente efficace è quella di un oggetto posto su una membrana elastica. L'oggetto appoggiato sulla membrana la deforma a causa del suo peso, quindi quello che possiamo constatare è che lo spazio intorno all'oggetto si è deformato e che quindi ogni altro oggetto intorno ad esso tenderà a scivolare sulla membrana, cadendo sull'oggetto che l'ha deformato.

---

<sup>16</sup> Il limite superiore di questo intervallo è dettato dalla grandezza presunta dell'universo conosciuto che si stima essere di 15 miliardi di anni luce.



Nell'immagine si vede una stella di grande massa che si trova in una regione dello spazio. Lo spazio in questa figura è rappresentato con la griglia bianca e si vede che in prossimità della stella massiccia la griglia si deforma, curvandosi maggiormente nelle immediate vicinanze della stella. In effetti possiamo dire che la curvatura segue la legge dell'inverso del quadrato. Ogni altro oggetto tenderà quindi a "scivolare" in questo imbuto andando a cadere sulla stella. Bisogna fare a questo punto delle osservazioni: la curvatura dello spazio è proporzionale alla quantità di massa, quindi maggiore è la massa, maggiore sarà la curvatura e quindi maggiore sarà la forza di attrazione tra i corpi. Inoltre, anche se difficile da accettare si deve sapere che anche la luce, quindi la radiazione elettromagnetica, subisce gli effetti della gravità, cosa che la meccanica classica non prevedeva assolutamente. Questo fenomeno è dovuto proprio alla deformazione dello spazio, infatti il raggio luminoso attraversando uno spazio curvo, descriverà necessariamente una traiettoria curva. Nell'immagine è disegnato un raggio di luce che viene curvato dalla presenza della stella. Questo effetto è stato utilizzato dall'equipe diretta da Artur Eddington per provare la teoria della relatività<sup>17</sup>.

Gli effetti della curvatura dello spazio sono ben visibili solo nel caso di oggetti molto massicci ma è chiaro che anche per masse più piccole vale la stessa legge, solo che gli effetti sono più che trascurabili. Alla luce di quanto detto possiamo esaminare il sistema mela-Terra in un altro modo. La mela quando cade sulla Terra è come se scivolasse nell'incurvatura spaziale generata dalla massa della Terra stessa. Anche la mela, come detto però, curva lo spazio intorno a se, ma lo scivolamento della Terra nella curvatura spaziale generata dalla mela è impossibile da osservare a causa dell'effetto infinitamente piccolo e quindi trascurabile.

L'effetto della curvatura dello spazio è in realtà difficile da osservare, questo perché l'interazione gravitazionale è una forza assai debole e per manifestarsi ha bisogno di grandi masse. Per rendersi conto di

---

<sup>17</sup> Infatti, durante una eclissi di sole del 29 maggio 1919, venne misurata la posizione di alcune stelle proiettate dietro il sole, queste risultavano essere in una posizione differente da dove si dovevano trovare in realtà. Usando i calcoli relativistici Einstein spiegò in modo esauriente la deflessione provocata dalla massa del sole. Le osservazioni vennero fatte in due posti distinti, in Brasile a Sobral e nell'isola di Principe.

questo si può fare il famoso esperimento che mette a confronto due forze fondamentali della natura: la forza gravitazionale e quella elettrostatica.

Basta strofinare una bacchetta di plastica con un panno di lana, in modo da produrre un eccesso di carica su una estremità, dopo di che se si avvicina la bacchetta a piccola distanza da un piccolo pezzo di carta si vede che il pezzetto di carta si solleva da terra e viene attratto dalla bacchetta poiché si è caricato per induzione. Questo fatto rende chiara una cosa, ovvero che il piccolo eccesso di carica generato dallo strofinio della bacchetta è stato sufficiente a vincere la forza di attrazione gravitazionale che l'intera Terra esercita sul pezzetto di carta. Questo fa comprendere che la forza gravitazionale è piccolissima rispetto alle altre forze fondamentali.

Nell'universo però ci sono masse gigantesche che rendono gli effetti della gravità molto importanti e quindi possono essere osservati con un certa facilità. Le masse esistenti nell'universo possono essere miliardi di volte più grandi di quelle del Sole.

Una varietà di oggetti cosmici molto esotici ed affascinanti sono i buchi neri, i quali sono così densi di materia che curvano lo spazio fino al punto di imbrigliare la radiazione visibile<sup>18</sup>. Accade quindi che la luce viene attratta dal buco nero rendendolo invisibile: da qui il nome buco (buca di potenziale) nero (non emette radiazione visibile). Come detto però il fascio luminoso non viene attratto per gravità, visto che la luce non possiede massa e l'interazione gravitazionale si esercita tra masse, ma la curvatura dello spazio è tale che la traiettoria si avvolge a spirale nella buca di potenziale creata dal buco nero.

Adesso bisogna fare un piccolo sforzo per accettare quanto segue. Noi tutti siamo immersi in uno spazio curvo, cioè siamo all'interno della buca di potenziale generata dalla Terra, di questo non ci accorgiamo se non facendo accuratissimi esperimenti. Allo stesso modo bisogna capire che il raggio luminoso di cui si parlava prima, è "convinto" di percorrere una traiettoria rettilinea e quindi non si "accorge" della curvatura dello spazio generata dal buco nero, tanto più perché i fotoni non sono in grado di interpretare la loro condizione!

Nel titolo di questo paragrafo è contenuto il termine "spazio-tempo", questo termine indica che nella teoria della relatività einsteiniana lo spazio è legato al tempo e viceversa. Questo vuol dire che quando una massa curva lo spazio circostante, influenza il tempo che quindi si modifica. Il fenomeno è di difficile interpretazione come la relatività del resto e questo è dovuto al fatto che è una teoria contro intuitiva<sup>19</sup>.

### **Cosa è un buco nero**

---

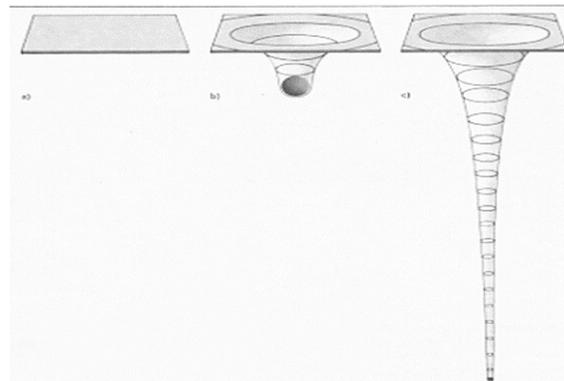
<sup>18</sup> Ma anche la radiazione in altre lunghezze d'onda.

<sup>19</sup> Bisogna accettare che non essendo alla portata della percezione sensoriale non può essere compresa se non con il mezzo dell'interpretazione razionale. Anche il mondo delle particelle elementari, non può essere visto né toccato a causa delle piccolissime dimensioni, ma può essere interpretato ragionando sugli effetti visibili e misurabili. Si veda ad esempio l'effetto fotoelettrico.

La fisica, è la scienza che studia le interazioni, ovvero il fisico, dall'osservazione del reale elabora una teoria e la modellizza. È vero anche che in alcuni casi è accaduto (e sempre più spesso accade) che si riesca a trovare una modellizzazione di un qualcosa che non si è osservato o che è causa indiretta di ciò che si osserva. Questo è uno dei casi emblematici della fisica, il caso dei buchi neri. Previsti dalla teoria della relatività generale di Einstein, i buchi neri non erano mai stati "osservati" prima della metà del secolo scorso. È possibile osservare però ciò che essi provocano intorno a sé.

I buchi neri sono oggetti estremamente massivi. Si trovano quasi in tutte le galassie di grandi dimensioni e più precisamente verso il centro galattico. Sono ciò che rimane di stelle molto massicce che dopo aver avuto un collasso gravitazionale violento iniziano a inglobare ed attrarre tutta la materia che le circonda. In questo modo l'oggetto acquista sempre più materia aumentando la sua massa e aumentando di conseguenza anche l'intensità del suo campo gravitazionale. Si pensa che questo processo non si arresti mai che il buco nero attragga materia senza limiti. Quando la massa dell'oggetto è abbastanza grande accade che l'intensità del campo gravitazionale è così importante da non permettere neanche alla radiazione<sup>20</sup> di uscire, quindi si rendono invisibili. L'unico modo di "osservarli" è quello di vedere come interagiscono con la materia (gas, stelle) circostante. (Vedi filmato)

Abbiamo visto che la massa, curva lo spazio, e possiamo immaginare la curvatura come una membrana elastica che si deforma in presenza di una massa. Bene, per un buco nero si crede che la massa sia così grande che questa deformazione assuma la forma di un imbuto. Nella figura possiamo avere una idea di ciò che si vuole dire.



Una precisazione che bisogna fare è la seguente. Quando la luce che proviene dall'esterno del buco nero passa nelle sue vicinanze, viene catturata e comincia a percorrere orbite sempre più fitte intorno al nucleo centrale,<sup>21</sup> mentre se il raggio luminoso passa ad una distanza maggiore, esso, verrà solo deflesso. Il fascino che circonda questi oggetti dell'universo è legato oltre che alla loro peculiare particolarità di non emettere

---

<sup>20</sup> In realtà in rarissimi casi si osservano emissioni MASER e di raggi gamma nelle immediate vicinanze di buchi neri, questo è dovuto con tutta probabilità all'avvenuta "fagocitazione" di grandi masse. I buchi neri emettono flussi di antiparticelle che prendono il nome di radiazione di Hawking.

<sup>21</sup> La zona centrale del buco nero è inscrivibile in una superficie presumibilmente sferica, detta orizzonte degli eventi.

radiazione a causa della immensa massa, anche per l'impossibilità da parte nostra di riuscire a comprenderne la natura e il loro funzionamento, questo perché la fisica che conosciamo potrebbe non essere più valida nelle sue immediate vicinanze.

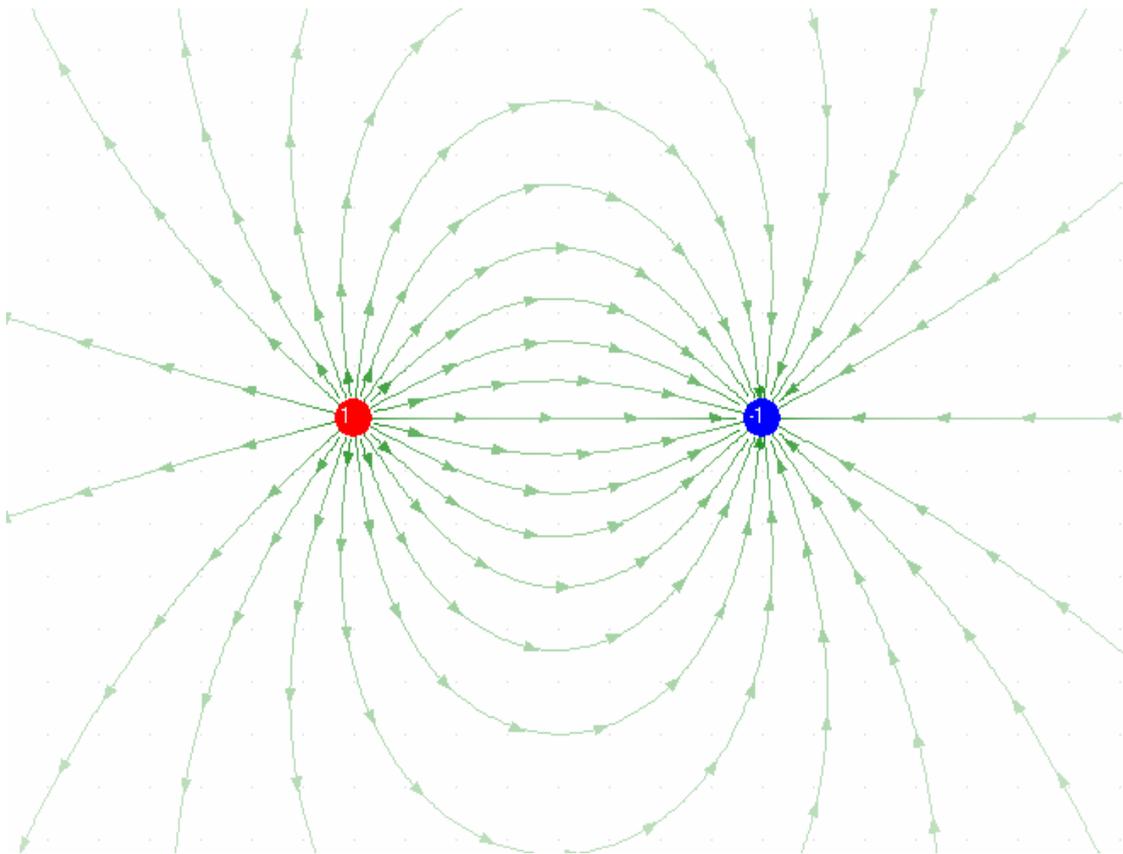
---

## CAMPO ELETTRICO

### UNITÁ DIDATTICA 3

ANNO 2007/2008

---



### **UNITÀ DIDATTICA 3 : IL CAMPO ELETTRICO**

Premessa: questa unità didattica dovrebbe essere introdotta nel corso del terzo anno PNI di un liceo scientifico. Ciononostante è plausibile che siano menzionati concetti didatticamente utili anche se saranno chiariti e specificati in modo rigoroso solo in seguito.

#### **Prerequisiti:**

- Conoscenze del concetto di carica elettrica
- Conduttori ed isolanti
- Legge di Coulomb
- Concetto di forza elettrica e forza gravitazionale
- Le forze come grandezze vettoriali
- Concetto fisico di lavoro
- Principi di conservazione dell'energia

#### **Accertamento dei prerequisiti:**

Per l'accertamento dei prerequisiti sarà utile procedere con una serie di domande brevi con risposte orali da parte degli studenti allo scopo di delle conoscenze teoriche e delle nozioni che servono alla comprensione delle spiegazioni successive. Per gli studenti, questo rappresenta un momento di ripasso della teoria. Qualche esercizio può essere di ulteriore aiuto.

#### **Obiettivi generali:**

- Acquisire le conoscenze, competenze e capacità previste dall'unità didattica
- Comprensione delle strumentazioni che sono state adoperate (anche storicamente) per le verifiche sperimentali delle teorie.
- Sollecitare l'interesse per gli aspetti storico-epistemologici della fisica.

#### **Obiettivi trasversali:**

- Sviluppare attitudine alla comunicazione e ai rapporti interpersonali favorendo lo scambio di opinioni tra docente e allievo e tra gli allievi
- Ampliare ulteriormente il processo di preparazione scientifica e culturale degli studenti
- Contribuire a sviluppare capacità logiche ed argomentative
- Sviluppare lo spirito critico e l'attitudine a riesaminare criticamente
- Sviluppare la capacità di sistemare logicamente le conoscenze acquisite

#### **Metodologie didattiche:**

Quando si introduce il concetto di campo elettrico è utile sottolineare l'analogia tra il campo gravitazionale creato da una massa centrale, già conosciuto, e il campo elettrostatico generato da una carica centrale (come del resto fanno quasi tutti i libri di fisica). Si cercherà di fare una lezione composta sia di spiegazione formale (storia, contenuti, formule, dimostrazioni) che di attivo confronto con gli studenti (domande, curiosità). A conclusione di ogni argomento si proporranno degli esercizi e magari brevi ricerche (internet, biblioteca) su personaggi storici e sulla tecnica delle macchine adoperate negli esperimenti.

Ogni volta che sarà stato esaurito un argomento si possono proporre semplici esercizi che utilizzino per la risoluzione le formule e i concetti appena spiegati.

**Strumenti utilizzati:**

- Libro di testo
- Lavagna e gessi
- Software E-field
- Calcolatrice scientifica
- Laboratorio (eventualmente)

**Controllo dell'apprendimento:**

- Verifiche orali
- Correzione di esercizi
- Verifica sommativa

**Misurazione:**

I momenti di valutazione formativa-sommativa si attueranno attraverso:

- Una prova orale individuale
- Una verifica sommativa

**Recupero:**

Sono previste attività di recupero articolate nei seguenti punti:

- Esercizi di classe
- Esercizi individuali

Per individuare gli argomenti che necessitano di recupero, sia a livello collettivo sia a livello individuale, ci si avvale della verifica sommativa, delle prove orali e dell'attività di discussione in classe.

**Tempi dell'intervento didattico:**

Le ore che verranno indicate si riferiscono solo ai momenti di spiegazione, ma ovviamente a queste saranno da aggiungere le ore che verranno impiegate per fare esercizi o chiarire alcuni punti. Stima complessiva del tempo necessario 8. Poiché le ore di fisica a settimana sono 2, l'unità didattica dovrebbe svolgersi in circa 4 settimane.

**Obiettivi specifici:**

**Conoscenze:**

- Conoscere il concetto di campo elettrico come vettore
- Conoscere la rappresentazione grafica di diverse distribuzioni di carica
- Conoscere il modo per calcolare l'intensità del campo elettrico di diverse distribuzioni di carica
- Conoscere il concetto di lavoro del campo elettrico, di energia potenziale, di potenziale elettrico
- Conoscere cosa è una differenza di potenziale d.d.p.
- Conoscere la conservazione dell'energia del campo elettrico
- Conoscere il concetto di lavoro del campo elettrico su una carica e di energia del campo elettrico

**Competenze:**

- Sapere il concetto di campo elettrico come vettore e saperlo rappresentare graficamente per diverse distribuzioni di carica
- Saper calcolare l'intensità del campo elettrico di diverse distribuzioni di carica
- Saper applicare il concetto di lavoro del campo elettrico, di energia potenziale, di potenziale elettrico, di differenza di potenziale e di conservazione dell'energia del campo elettrico

**Capacità:**

- Saper utilizzare le conoscenze e le competenze acquisite per risolvere problemi

**Contenuti:**

- Introduzione al concetto di campo elettrico
- Vettore campo elettrico e sua rappresentazione grafica
- Linee di forza del campo elettrico generato da una, due e più cariche puntiformi
- Intensità del campo elettrico generato da distribuzioni differenti di cariche
- lavoro del campo elettrico
- energia potenziale elettrica
- conservazione dell'energia nel campo elettrico
- potenziale elettrico

## CONTENUTI

### Introduzione al campo elettrico

Parto dal concetto noto da tutti di isobare (viste nell'UD 2), ossia le linee curve chiuse con le quali, in meteorologia si individuano le aree geografiche interessate dalla stessa pressione atmosferica (o anche le isoipse). Su ogni punto di quella linea curva si può dire che ci siano le stesse condizioni di pressione, o meglio possiamo affermare che tutti i punti che compongono quella linea curva hanno le stesse condizioni di pressione. L'analogia con il campo generato da una carica risulta chiaro se pensiamo che intorno alla carica (consideriamola dapprima unica e puntiforme) disegniamo delle curve concentriche che sono l'insieme di tutti i punti alla stessa distanza dalla carica dove la forza ha lo stesso valore.

Visto che, intorno alla carica centrale poniamo una carica di prova essa risente di una forza proporzionale alle cariche e all'inverso del quadrato della distanza<sup>22</sup>. Possiamo affermare che intorno alla carica è presente un campo di forza, e questo campo è di natura vettoriale. Infatti l'interazione delle due cariche possiamo individuarle con delle forze che sono dei vettori, cioè hanno direzione, verso e intensità. Concludiamo dicendo che il campo elettrico generato da una o più cariche è di natura vettoriale e in quanto tale possiede un verso una direzione e una intensità.

Un campo vettoriale già a noi noto è il campo gravitazionale. Ci sono molte analogie tra campo gravitazionale ed elettrico, sia per la sorprendente somiglianza delle forze generate nell'uno e nell'altro caso ma anche per l'interpretazione vettoriale che se ne può dare ad entrambi.

### Il vettore campo elettrico

Visto che abbiamo detto che il campo elettrico è una grandezza di tipo vettoriale, può essere interessante conoscere come questo varia al variare della distanza e al variare della carica che lo ha generato. Se volessimo calcolare quindi il campo elettrico generato da una carica (caso semplice) possiamo partire dal considerare che la legge di Newton afferma che

$$F = ma$$

E che la legge di gravitazione universale possiamo scriverla come

$$F = G \frac{mM}{R^2}$$

Uguagliando le due forze, capiamo bene che se tutte e due rappresentano la stessa situazione allora è evidente che  $a = GM / R^2$ .

La forza elettrica che intercorre tra la carica generatrice del campo e la carica di prova o un'altra carica generica è proporzionale direttamente alle due cariche per una costante inversamente al quadrato della distanza.

$$F_{elettrica} = k \frac{q_{prova} Q_{generatrice}}{R^2}$$

---

<sup>22</sup>Tutti i fenomeni che si propagano in linea retta nello spazio hanno un andamento che è proporzionale a  $\approx 1/R^2$ . Alcuni esempi sono la legge della forza gravitazionale, forza del campo elettrico, campo magnetico fino alla propagazione della luce.

Noi chiameremo il campo elettrico  $E$  il quale è direttamente proporzionale alla carica e alla costante  $k$  e inversamente proporzionale al quadrato della distanza. In definitiva possiamo scrivere che

$$F_{elettrica} = qE_{el}$$

Ricordando che sia la forza che il campo sono due grandezze vettoriali, quindi scriviamo che il campo elettrico è

$$\vec{E}_{el} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}$$

Quindi l'intensità del campo elettrico è misurata in Newton/Coulomb ossia, N/C.

Adesso che sappiamo come calcolare il vettore campo elettrico in funzione della forza e della carica è necessario capire come rappresentare il campo generato da una carica o da una distribuzione generica di cariche.

Partiamo dal caso più semplice che si può presentare: campo elettrico generato da una carica puntiforme, ferma. In questo caso il campo generato è detto **centrale**, come del resto è anche il campo gravitazionale.

Le linee di forza in questo caso sono dirette radialmente rispetto alla carica. Per convenzione<sup>23</sup> se la carica è positiva le linee di forza del campo elettrico sono dirette verso l'esterno e si indicheranno quindi con delle frecce (vettori) uscenti dalla carica e dirette all'infinito, nel caso in cui la carica fosse negativa le linee di forza saranno sempre radiali e dirette dall'infinito verso il centro della carica.

Quindi abbiamo visto che il campo generato da una carica puntiforme è radiale rispetto a la carica stessa, adesso vediamo che caratteristiche ha un campo generato da due cariche uguali, nelle due configurazioni possibili: stesso segno e segno diverso.

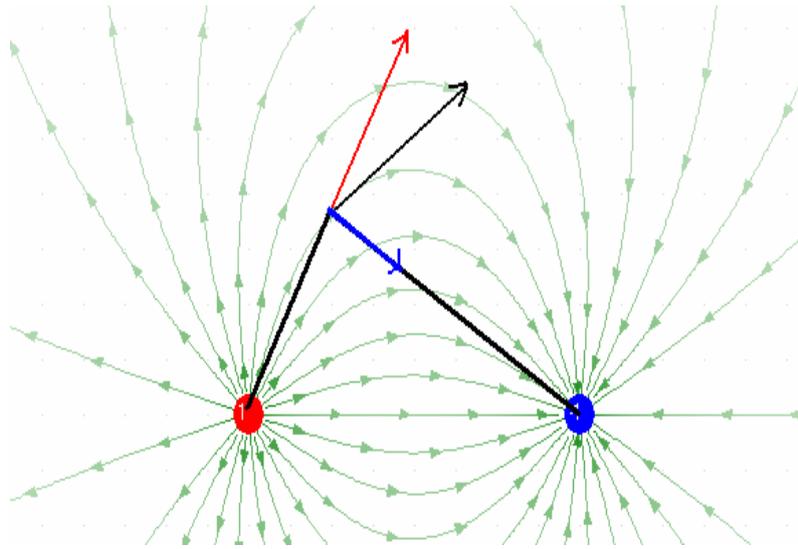
### Calcoliamo la direzione delle linee di forza del campo elettrico.

Nella figura vediamo a che tipo di forze soggetta una particella che si trova in una regione intorno alle due cariche. La particella di prova in questo caso è positiva e vediamo che è attratta dalla carica negativa (vettore blu) e respinta da quella positiva (vettore rosso) quindi sommando i due vettori con la regola del parallelogramma si ottiene la forza risultante sulla carica di prova in quel punto<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> Le convenzioni in fisica sono molto importanti. In elettrostatica si dice che una carica è positiva (+) semplicemente per differenziarla da una negativa (-). Deve però essere chiaro che quando parliamo di carica fondamentale negativa si vuole intendere la più piccola carica negativa possibile, ovvero l'elettrone. Quando si parlerà di carica fondamentale positiva si intenderà un protone, ovvero la più piccola carica positiva che si può trovare in natura (vedi anche teoria dei quark). Le cariche del protone e dell'elettrone sono molto simili ma di verso opposto e per convenzione all'elettrone è stata assegnata l'aggettivo negativo e al protone l'aggettivo positivo. Carica dell'elettrone  $\approx 1,6 \times 10^{-19}$  C

<sup>24</sup> Anche se la figura non è troppo esemplificativa, è da notare che il vettore risultante (vettore nero) è in ogni punto tangente alle linee di forza del campo elettrico.



**Figura 1: In questa figura si vede come è possibile punto per punto calcolare l'andamento delle linee di forza generate dalle cariche. Il metodo è ovviamente valido sia nel caso di due cariche di segno opposto che dello stesso segno, o in una distribuzione qualunque di carica in uno spazio.**

Prima di cominciare a discutere di quello che accade quando consideriamo più cariche, vorrei che fosse chiaro che stiamo analizzando casi molto semplici e che spesso la realtà è assai più complessa, e di questo possiamo avere un'idea se osserviamo la seguente immagine. Calcolare in questo caso la risultante vettoriale di tutte le forze in gioco è a dir poco difficile senza l'aiuto di un software.

**Figura 2: Un esempio di come possono essere complesse le distribuzioni di carica nel mondo fisico reale. Questa rimane comunque una simulazione fatta con un software (E-Field) il quale calcola il campo generato da delle cariche stazionarie.**

Spesso però grazie alla teoria possiamo apportare delle semplificazioni che ci aiutano a comprendere con ottima approssimazione quello che accade anche in sistemi complessi.

### **Distribuzioni di carica particolari**

Consideriamo due distribuzioni di carica che nei futuri studi di fisica e in alcune esperienze di laboratorio è facile trovare ovvero la distribuzione sferica o a simmetria centrale e distribuzione piana.

## ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA E LAVORO DEL CAMPO ELETTRICO

Il concetto di potenziale dovrebbe già essere un concetto familiare, perché studiato nel caso di masse in movimento rispetto al suolo o di molle compresse ecc. Adesso però parliamo di energia potenziale del campo elettrico. In analogia con il campo gravitazione terrestre sappiamo che se spostiamo una massa da una regione ad un'altra dello spazio intorno ad una massa centrale, il campo gravitazionale generato dalla massa stessa compie un lavoro che è dipendente solo dalla posizione iniziale e finale. Questo lavoro è uguale alla variazione dell'energia potenziale.

Se una carica di prova o una qualsiasi carica si sposta da una posizione ad un'altra intorno ad una carica (diciamo fissa per semplicità) che genera il campo, possiamo affermare che per spostare la carica sarà stato compiuto del lavoro<sup>25</sup>. Questo lavoro è stato compiuto dal campo elettrico.

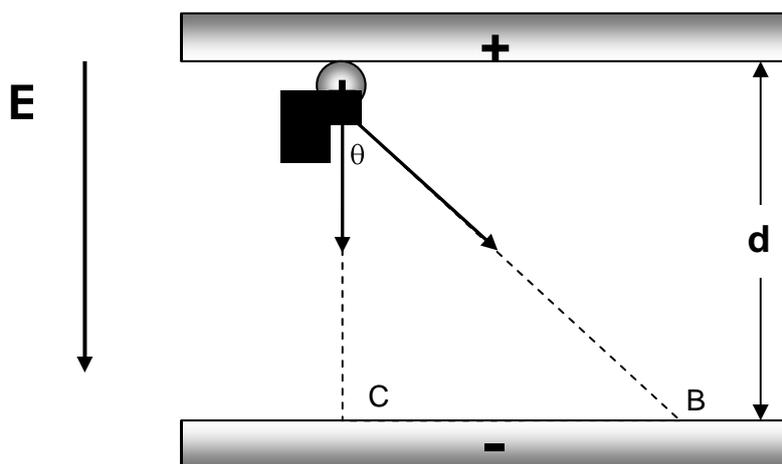
Il lavoro è sempre dato da una forza per uno spostamento e in questo caso useremo la forza elettrica che già conosciamo  $F=qE$ . Il lavoro quindi sarà

$$L = Eqs$$

dove  $s$  è lo spostamento e  $q$  è la carica.

Consideriamo adesso un caso particolare per spiegare come interpretare il moto di una carica quando è immersa in un campo elettrico costante.

Un campo elettrico costante si può ottenere ponendo due lamine cariche di segno opposto poste parallele tra loro e a breve distanza  $d$ . Facendo riferimento alla figura vediamo che se poniamo una carica positiva su una delle due lamine (nel caso specifico quella positiva) la carica risentirà di una forza che è diretta nella direzione del campo elettrico. naturalmente la carica lasciata libera di muoversi si sposterà da una lamina all'altra seguendo una traiettoria rettilinea e diretta parallelamente alle linee di forza.



**Figura 3: Carica positiva immersa in un campo elettrico costante generato da due lamine parallele.**

<sup>25</sup> Dobbiamo ricordare che nel caso del campo gravitazionale la forza è sempre di tipo attrattivo, mentre nel caso delle cariche possiamo avere il caso repulsivo ed attrattivo, che comunque non altera le considerazioni che si vanno a fare sul lavoro fatto dal campo elettrico.

Se volessimo calcolare il lavoro compiuto dal campo elettrico sulla carica scriveremo che è uguale alla forza elettrica per lo spostamento o in modo equivalente possiamo scrivere  $L = Eqd$  dove con  $d$  indichiamo la distanza tra le lamine  $q$  è la carica da spostare ed  $E$  il campo elettrico generato dalle due lamine. Se volessimo fare arrivare la carica allo stesso punto ma con un percorso diverso, ad esempio il percorso ABC dobbiamo calcolare il lavoro compiuto sulla carica nel tragitto AB e poi sommarlo a quello necessario per spostarla nel tratto BC.

Calcoliamo i lavori.

$$L_{AB} = qE \overline{AB} \cos \theta$$

dove abbiamo usato la componente della forza utile allo spostamento.

Infatti sappiamo che la componente della forza che è ortogonale al campo elettrico non contribuisce in alcun modo al lavoro, infatti quando andiamo a calcolare il lavoro sul tratto BC vediamo che è nullo poiché lo spostamento è ortogonale alle linee di forza del campo<sup>26</sup>.

Possiamo concludere che il lavoro del campo elettrico dipende solo dalla posizione iniziale e finale e non dal percorso fatto dalla carica.

In analogia con il caso del campo gravitazionale (dove l'energia potenziale è uguale al lavoro) possiamo affermare che anche nel caso del campo elettrico il potenziale elettrico è uguale al lavoro fatto per spostare la carica da un punto ad un altro dello spazio. Considerando ciò che si è detto prima per il lavoro possiamo affermare che il campo elettrico che genera il potenziale è un campo conservativo.

## POTENZIALE ELETTRICO

Definiamo adesso il potenziale elettrico come l'energia o il lavoro necessario per spostare una carica da un punto ad un altro dello spazio.

$$\Delta U = -L$$

Quando si parla di campi elettrici si utilizza una nuova grandezza che chiamiamo potenziale elettrico o tensione e la si sceglie in modo tale che sia indipendente dalla carica  $q$ .

Definiamo potenziale elettrico

$$V = \frac{U}{q}$$

Considerando il potenziale in un punto A e B possiamo scrivere

$$V_A - V_B = \frac{U_A - U_B}{q} = \frac{L_{AB}}{q}$$

---

<sup>26</sup> Ricordiamo che la direzione delle linee di forza del campo elettrico hanno la stessa direzione del campo stesso, ossia  $\vec{E} // \vec{F}$ .

Cioè abbiamo espresso il potenziale elettrico nei punti A e B in funzione del lavoro fatto per spostare la carica  $q$  da una posizione all'altra.  $V_A - V_B$  è detta differenza di potenziale. Per misurare la nuova grandezza introdotta si usa il Volt (simbolo V) che è uguale a

$$\text{volt} = \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Detto in altri termini, tra due punti di un campo elettrico esiste la differenza di potenziale (d.d.p) di 1 volt se la forza elettrica del campo compie un lavoro di 1 joule per portare la carica di 1 coulomb da un punto all'altro.

Facciamo due considerazioni: se il lavoro è  $L_{AB} = F \cdot s = q \cdot E \cdot s$  allora possiamo scrivere la d.d.p. come segue

$$V_A - V_B = \frac{q \cdot E \cdot s}{q} \Rightarrow V_A - V_B = E \cdot s$$

osservando che la d.d.p. è indipendente quindi è indipendente dalla carica.

Concludiamo dicendo che tra due lamine caricate con cariche di segno opposto c'è sempre una differenza di potenziale diversa da zero, ovvero una carica all'interno della regione interessata dal campo elettrico si muoverà sotto l'azione della differenza di potenziale.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.