

# Elettromagnetismo nelle scuole secondarie superiori

Biagio Buonaura, Giuseppe Giuliani

Nola, Pavia

7 settembre 2022

# Premessa

È ormai consolidata l'usanza di aprire i manuali di fisica con una introduzione sul “metodo scientifico” e sulla sua applicazione alla fisica. Tuttavia, in generale, queste dichiarazioni di principio non sono coerentemente applicate nelle pagine a seguire. Inoltre, i problemi filosofici riguardanti il rapporto tra le descrizioni della fisica (le sue teorie) e la realtà del Mondo sono completamente ignorati eludendo così anche i vari richiami alla opportunità di un approccio multidisciplinare laddove sia ragionevolmente praticabile.

Non sorprende quindi se, nella trattazione dei vari argomenti, prevalga poi una impostazione epistemologica di tipo essenzialmente induttivo che allontana sullo sfondo il ruolo essenziale delle teorie o, nel peggiore dei casi, ne stravolge il significato fisico e filosofico.

**Questa situazione si verifica in modo particolarmente grave nel caso dell'elettromagnetismo.** Le ragioni sono abbastanza chiare. Non è possibile una trattazione accettabile dell'elettromagnetismo senza l'uso costitutivo del concetto di campo, il riconoscimento del fatto che le interazioni fisiche si propagano con velocità finita, la consapevolezza del significato del concetto di “causa”, dei limiti della sua applicazione alla fisica e, in generale alla scienza.

Se si pensa che, nel corso di Storia della filosofia, gli studenti del terzo anno hanno a che fare con la discussione di Aristotele sul concetto di causa, ci troviamo immediatamente di fronte al dramma della sostanziale natura nozionistica dell'insegnamento. Gli studenti discutano delle varie accezioni del concetto di “causa” in Aristotele, annusano che un concetto di causa aleggia anche nelle scienze, ma non sanno di cosa stanno parlando perché privi di qualunque faro, anche tenue, che li possa guidare.

C'è qualcosa che non va?

## C'è qualcosa che non va

Quello che segue intende essere un contributo alla discussione, basato sui seguenti punti:

- Necessità di una impostazione dell'insegnamento dell'elettromagnetismo – e, più in generale della fisica – basato su alcune **assunzioni** filosofiche ed epistemologiche che possano essere, per gli studenti, criteri - guida nel processo di apprendimento

# C'è qualcosa che non va

Quello che segue intende essere un contributo alla discussione, basato sui seguenti punti:

- Necessità di una impostazione dell'insegnamento dell'elettromagnetismo – e, più in generale della fisica – basato su alcune **assunzioni** filosofiche ed epistemologiche che possano essere, per gli studenti, criteri - guida nel processo di apprendimento
- Come vedremo, questi criteri caratterizzano anche il **senso comune razionalmente orientato** che dovrebbe guidare il cittadino nella vita quotidiana

# C'è qualcosa che non va

Quello che segue intende essere un contributo alla discussione, basato sui seguenti punti:

- Necessità di una impostazione dell'insegnamento dell'elettromagnetismo – e, più in generale della fisica – basato su alcune **assunzioni** filosofiche ed epistemologiche che possano essere, per gli studenti, criteri - guida nel processo di apprendimento
- Come vedremo, questi criteri caratterizzano anche il **senso comune razionalmente orientato** che dovrebbe guidare il cittadino nella vita quotidiana
- Applicazione coerente di questi criteri nell'insegnamento

# I presupposti filosofici della scienza

L'analisi storica mostra che la Scienza si è sviluppata sulla base di tre presupposti filosofici, che stanno anche alla base del senso comune razionalmente orientato:

- **ESISTE UN MONDO, INDIPENDENTE DALL'OSSERVATORE, DI CUI L'OSSERVATORE FA PARTE**

Questo postulato può essere sostenuto con argomenti razionali; e, sebbene sia stato posto in discussione con argomentazioni di vario genere, sovente al limite del paradosso, costituisce il fondamento della Scienza e del senso comune razionalmente orientato

# I presupposti filosofici della scienza

L'analisi storica mostra che la Scienza si è sviluppata sulla base di tre presupposti filosofici, che stanno anche alla base del senso comune razionalmente orientato:

- **ESISTE UN MONDO, INDIPENDENTE DALL'OSSERVATORE, DI CUI L'OSSERVATORE FA PARTE**

Questo postulato può essere sostenuto con argomenti razionali; e, sebbene sia stato posto in discussione con argomentazioni di vario genere, sovente al limite del paradosso, costituisce il fondamento della Scienza e del senso comune razionalmente orientato

- **IL FUNZIONAMENTO DEL MONDO È COSTANTE NEL TEMPO (RIPRODUCIBILITÀ DEI FENOMENI)**

Questo postulato costituisce il presupposto di ogni conoscenza del Mondo ed è stato, sinora, corroborato dall'esperienza

# I presupposti filosofici della scienza

L'analisi storica mostra che la Scienza si è sviluppata sulla base di tre presupposti filosofici, che stanno anche alla base del senso comune razionalmente orientato:

- **ESISTE UN MONDO, INDIPENDENTE DALL'OSSERVATORE, DI CUI L'OSSERVATORE FA PARTE**

Questo postulato può essere sostenuto con argomenti razionali; e, sebbene sia stato posto in discussione con argomentazioni di vario genere, sovente al limite del paradosso, costituisce il fondamento della Scienza e del senso comune razionalmente orientato

- **IL FUNZIONAMENTO DEL MONDO È COSTANTE NEL TEMPO (RIPRODUCIBILITÀ DEI FENOMENI)**

Questo postulato costituisce il presupposto di ogni conoscenza del Mondo ed è stato, sinora, corroborato dall'esperienza

- **PRINCIPIO DI CAUSALITÀ: OGNI EVENTO HA UNA CAUSA**

Il principio di causalità svolge un ruolo **euristico** fondamentale perché si traduce nell'**impegno metodologico della ricerca delle cause dei fenomeni**

# Il senso comune razionalmente orientato

Il senso comune razionalmente orientato **condivide alcuni fondamentali valori che stanno alla base della pratica scientifica**. In particolare:

- Rifiuta le posizioni dogmatiche: di conseguenza, valuta le idee sulla base della loro consistenza logica rispetto al contesto in cui sono inserite e tenendo conto del loro fondamento empirico

# Il senso comune razionalmente orientato

Il senso comune razionalmente orientato **condivide alcuni fondamentali valori che stanno alla base della pratica scientifica**. In particolare:

- Rifiuta le posizioni dogmatiche: di conseguenza, valuta le idee sulla base della loro consistenza logica rispetto al contesto in cui sono inserite e tenendo conto del loro fondamento empirico
- Elabora immagini del Mondo basate su conoscenze considerate ragionevolmente acquisite

## Il senso comune razionalmente orientato

Il senso comune razionalmente orientato **condivide alcuni fondamentali valori che stanno alla base della pratica scientifica**. In particolare:

- Rifiuta le posizioni dogmatiche: di conseguenza, valuta le idee sulla base della loro consistenza logica rispetto al contesto in cui sono inserite e tenendo conto del loro fondamento empirico
- Elabora immagini del Mondo basate su conoscenze considerate ragionevolmente acquisite
- Considera il dissenso come una naturale manifestazione di punti di vista differenti e ritiene che le divergenze di opinione possano essere razionalmente ricomposte

## Il senso comune razionalmente orientato

Il senso comune razionalmente orientato **condivide alcuni fondamentali valori che stanno alla base della pratica scientifica**. In particolare:

- Rifiuta le posizioni dogmatiche: di conseguenza, valuta le idee sulla base della loro consistenza logica rispetto al contesto in cui sono inserite e tenendo conto del loro fondamento empirico
- Elabora immagini del Mondo basate su conoscenze considerate ragionevolmente acquisite
- Considera il dissenso come una naturale manifestazione di punti di vista differenti e ritiene che le divergenze di opinione possano essere razionalmente ricomposte
- Tuttavia, è consapevole che una composizione razionale delle divergenze è ostacolata, e sovente impedita, da scelte di valore, da pregiudizi o credenze religiose, da interessi economici e da componenti affettive

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo
- Il metodo induttivo può essere **idealizzato** in questo modo. . .

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo
- Il metodo induttivo può essere **idealizzato** in questo modo. . .
- La conoscenza acquisita e l'immagine del Mondo dello scienziato gli suggeriscono di fare un esperimento adatto a verificare un'ipotesi su come un fenomeno dovrebbe svolgersi

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo
- Il metodo induttivo può essere **idealizzato** in questo modo. . .
- La conoscenza acquisita e l'immagine del Mondo dello scienziato gli suggeriscono di fare un esperimento adatto a verificare un'ipotesi su come un fenomeno dovrebbe svolgersi
- Si danno due casi: l'ipotesi è confermata oppure no dall'esperimento

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo
- Il metodo induttivo può essere **idealizzato** in questo modo. . .
- La conoscenza acquisita e l'immagine del Mondo dello scienziato gli suggeriscono di fare un esperimento adatto a verificare un'ipotesi su come un fenomeno dovrebbe svolgersi
- Si danno due casi: l'ipotesi è confermata oppure no dall'esperimento
- Se l'ipotesi è falsificata dall'esperimento lo scienziato deve ricominciare da capo

# Il metodo induttivo

- La fisica e la scienza si sono sviluppate applicando due metodi di indagine
- Un metodo induttivo e . . .
- Un metodo ipotetico - deduttivo
- Il metodo induttivo può essere **idealizzato** in questo modo. . .
- La conoscenza acquisita e l'immagine del Mondo dello scienziato gli suggeriscono di fare un esperimento adatto a verificare un'ipotesi su come un fenomeno dovrebbe svolgersi
- Si danno due casi: l'ipotesi è confermata oppure no dall'esperimento
- Se l'ipotesi è falsificata dall'esperimento lo scienziato deve ricominciare da capo
- Michael Faraday ha applicato sistematicamente questo metodo: "Il metodo usato da Faraday nelle sue ricerche consisteva in un appello costante all'esperimento come mezzo per verificare la correttezza delle sue idee, e in un costante sviluppo (cultivation) delle idee sotto la diretta influenza dell'esperimento **Maxwell - Trattato, 2 vol, p. 163**"

# Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica

## Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica
- Esso si basa sulla assunzione di un insieme di postulati da cui **dedurre** la predizione dei possibili valori di **tutte** le grandezze fisiche usate

## Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica
- Esso si basa sulla assunzione di un insieme di postulati da cui **dedurre** la predizione dei possibili valori di **tutte** le grandezze fisiche usate
- La teoria così sviluppata deve riguardare tutti i fenomeni osservati nel suo **dominio di applicazione** e, possibilmente, prevedere nuovi fenomeni

## Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica
- Esso si basa sulla assunzione di un insieme di postulati da cui **dedurre** la predizione dei possibili valori di **tutte** le grandezze fisiche usate
- La teoria così sviluppata deve riguardare tutti i fenomeni osservati nel suo **dominio di applicazione** e, possibilmente, prevedere nuovi fenomeni
- Nelle Scuole Secondarie Superiori esso è applicato - più o meno rigorosamente - alla dinamica newtoniana e alla termodinamica

## Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica
- Esso si basa sulla assunzione di un insieme di postulati da cui **dedurre** la predizione dei possibili valori di **tutte** le grandezze fisiche usate
- La teoria così sviluppata deve riguardare tutti i fenomeni osservati nel suo **dominio di applicazione** e, possibilmente, prevedere nuovi fenomeni
- Nelle Scuole Secondarie Superiori esso è applicato - più o meno rigorosamente - alla dinamica newtoniana e alla termodinamica
- Nel caso dell'elettromagnetismo questo tipo di trattazione non è possibile perché basata sulla assunzione delle equazioni di Maxwell

## Il metodo ipotetico - deduttivo

- Il metodo ipotetico - deduttivo è tipico di una fase matura di una branca della fisica
- Esso si basa sulla assunzione di un insieme di postulati da cui **dedurre** la predizione dei possibili valori di **tutte** le grandezze fisiche usate
- La teoria così sviluppata deve riguardare tutti i fenomeni osservati nel suo **dominio di applicazione** e, possibilmente, prevedere nuovi fenomeni
- Nelle Scuole Secondarie Superiori esso è applicato - più o meno rigorosamente - alla dinamica newtoniana e alla termodinamica
- Nel caso dell'elettromagnetismo questo tipo di trattazione non è possibile perché basata sulla assunzione delle equazioni di Maxwell
- È quindi necessario individuare una trattazione alternativa che - tuttavia - preservi la natura relativistica dell'elettromagnetismo

# Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica newtoniana

- Le leggi della meccanica hanno la stessa forma in ogni SRI [Trasformazioni di Galileo]

# Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica newtoniana

- Le leggi della meccanica hanno la stessa forma in ogni SRI [Trasformazioni di Galileo]



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

## Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica newtoniana

- Le leggi della meccanica hanno la stessa forma in ogni SRI [Trasformazioni di Galileo]



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- Principio di azione e reazione: se un corpo A esercita una forza  $\vec{F}$  sul corpo B, allora B esercita **istantaneamente** la forza  $-\vec{F}$  sul corpo A

## Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica newtoniana

- Le leggi della meccanica hanno la stessa forma in ogni SRI [Trasformazioni di Galileo]



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- Principio di azione e reazione: se un corpo A esercita una forza  $\vec{F}$  sul corpo B, allora B esercita **istantaneamente** la forza  $-\vec{F}$  sul corpo A
- Questo principio presuppone che le interazioni fisiche si propaghino con velocità infinita

# Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica relativistica

- Le leggi della dinamica hanno la stessa forma in ogni sistema di riferimento  
[Trasformazioni di Lorentz]

# Il metodo ipotetico - deduttivo. Dinamica relativistica

- Le leggi della dinamica hanno la stessa forma in ogni sistema di riferimento  
[Trasformazioni di Lorentz]

- 

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}; \quad \vec{p} = m(\gamma\vec{v}); \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche ◦ sono attribuite a entità teoriche ◦ descrivono interazioni tra entità teoriche

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- **Per esempio**: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone. . .

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- **Per esempio**: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone. . .
- la velocità, rispetto ad un sistema di riferimento, è **attribuita** ad un punto materiale, ad un corpo rigido o a un elettrone. . .

# Come è fatta una teoria

- Le teorie usano, tra l'altro, i concetti di **entità teorica** e di **grandezza fisica**
- Esempi di entità teoriche sono: sistema di riferimento, punto materiale, gas, elettrone. . .
- Le grandezze fisiche descrivono proprietà delle entità teoriche o sono attribuite a entità teoriche o descrivono interazioni tra entità teoriche
- **Per esempio**: la massa descrive una **proprietà** di un punto materiale, di un corpo rigido, di un gas o di un elettrone. . .
- la velocità, rispetto ad un sistema di riferimento, è **attribuita** ad un punto materiale, ad un corpo rigido o a un elettrone. . .
- la forza **descrive** l'interazione tra due corpi rigidi o tra due elettroni.

# Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:

# Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura

# Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura
- Individuare le connessioni causali operanti **nella teoria**.

# Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura
- Individuare le connessioni causali operanti **nella teoria**.
- Nei fenomeni descritti dalla teoria e che si svolgono nel Mondo, operano, **plausibilmente**, connessioni causali corrispondenti

# Interpretazione di una teoria

- Per interpretare una teoria dobbiamo:
- Individuare le grandezze fisiche da sottoporre a misura
- Individuare le connessioni causali operanti **nella teoria**.
- Nei fenomeni descritti dalla teoria e che si svolgono nel Mondo, operano, **plausibilmente**, connessioni causali corrispondenti
- Queste condizioni valgono anche per la fisica quantica.

# Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.

# Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.

# Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.

# Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.
- Per esempio: Maxwell ha misurato la rigidità dell'Etere, la cui esistenza nel Mondo era allora plausibile. Ma ora non lo è più.

# Le grandezze fisiche

- In generale, le grandezze fisiche **possono essere misurate**, almeno in linea di principio.
- Una teoria **interpretata** indica o suggerisce quali sono le grandezze fisiche da sottoporre a misura.
- Il fatto che una grandezza fisica sia misurata non implica che l'entità teorica, di cui essa descrive una proprietà, esista nel Mondo.
- Per esempio: Maxwell ha misurato la rigidità dell'Etere, la cui esistenza nel Mondo era allora plausibile. Ma ora non lo è più.
- Oggi, i fisici dello stato solido misurano le proprietà delle buche (carica elettrica, massa effettiva, mobilità elettrica, lunghezza di diffusione). Ma l'esistenza delle buche nel Mondo non è plausibile.

# Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.

# Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.
- Le procedure sperimentali usate per misurare una grandezza fisica sono, in generale, suggerite dalla conoscenza acquisita e non hanno una connessione diretta con la teoria che utilizza questa grandezza.

# Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.
- Le procedure sperimentali usate per misurare una grandezza fisica sono, in generale, suggerite dalla conoscenza acquisita e non hanno una connessione diretta con la teoria che utilizza questa grandezza.
- Per esempio: nel 1916, Robert Millikan misurò la costante  $h$  di Planck convalidando sperimentalmente l'equazione dell'effetto fotoelettrico, scritta da Einstein nel 1905:

$$E_{cin} = h\nu - P$$

dove  $E_{cin}$  è l'energia cinetica degli elettroni emessi,  $h\nu$  l'energia dei fotoni incidenti sul metallo e  $P$  la "funzione lavoro", cioè l'energia necessaria per estrarre gli elettroni con velocità nulla dopo l'estrazione

# Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.
- Le procedure sperimentali usate per misurare una grandezza fisica sono, in generale, suggerite dalla conoscenza acquisita e non hanno una connessione diretta con la teoria che utilizza questa grandezza.
- Per esempio: nel 1916, Robert Millikan misurò la costante  $h$  di Planck convalidando sperimentalmente l'equazione dell'effetto fotoelettrico, scritta da Einstein nel 1905:

$$E_{cin} = h\nu - P$$

dove  $E_{cin}$  è l'energia cinetica degli elettroni emessi,  $h\nu$  l'energia dei fotoni incidenti sul metallo e  $P$  la "funzione lavoro", cioè l'energia necessaria per estrarre gli elettroni con velocità nulla dopo l'estrazione

- Come è noto, Millikan misurò la differenza di potenziale – applicata tra il metallo emittente e l'elettrodo che raccoglie gli elettroni emessi – necessaria per annullare la corrente circolante nel circuito di misura

# Che cosa è una misura

- Una misura consiste in un insieme di procedure sperimentali che permette di attribuire ad una grandezza fisica un valore **definito** con un margine di errore.
- Le procedure sperimentali usate per misurare una grandezza fisica sono, in generale, suggerite dalla conoscenza acquisita e non hanno una connessione diretta con la teoria che utilizza questa grandezza.
- Per esempio: nel 1916, Robert Millikan misurò la costante  $h$  di Planck convalidando sperimentalmente l'equazione dell'effetto fotoelettrico, scritta da Einstein nel 1905:

$$E_{cin} = h\nu - P$$

dove  $E_{cin}$  è l'energia cinetica degli elettroni emessi,  $h\nu$  l'energia dei fotoni incidenti sul metallo e  $P$  la "funzione lavoro", cioè l'energia necessaria per estrarre gli elettroni con velocità nulla dopo l'estrazione

- Come è noto, Millikan misurò la differenza di potenziale – applicata tra il metallo emittente e l'elettrodo che raccoglie gli elettroni emessi – necessaria per annullare la corrente circolante nel circuito di misura
- Quindi la costante di Planck – base di tutta la fisica quantica – è stata misurata misurando una differenza di potenziale

# I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni

## I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni
- Un altro elemento di teoria è quello secondo cui un elettrone dotato di velocità può essere fermato immergendolo in un campo elettrico opportuno

## I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni
- Un altro elemento di teoria è quello secondo cui un elettrone dotato di velocità può essere fermato immergendolo in un campo elettrico opportuno
- Complessivamente, possiamo affermare che la misura della costante di Planck si basa sul principio fondamentale della conservazione dell'energia e su un “frammento” della teoria elettromagnetica

## I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni
- Un altro elemento di teoria è quello secondo cui un elettrone dotato di velocità può essere fermato immergendolo in un campo elettrico opportuno
- Complessivamente, possiamo affermare che la misura della costante di Planck si basa sul principio fondamentale della conservazione dell'energia e su un “frammento” della teoria elettromagnetica
- Quindi, ogni misura è **carica di teoria**. In generale, questi frammenti di teorie fanno parte della conoscenza considerata acquisita

## I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni
- Un altro elemento di teoria è quello secondo cui un elettrone dotato di velocità può essere fermato immergendolo in un campo elettrico opportuno
- Complessivamente, possiamo affermare che la misura della costante di Planck si basa sul principio fondamentale della conservazione dell'energia e su un “frammento” della teoria elettromagnetica
- Quindi, ogni misura è **carica di teoria**. In generale, questi frammenti di teorie fanno parte della conoscenza considerata acquisita
- Tuttavia, il valore numerico ottenuto in una misura **non** dipende dalla teoria usata

## I dati sperimentali sono “carichi di teoria” [Theory - laden, Norwood Russell Hanson]

- La misura della costante di Planck si basa sul principio di conservazione dell'energia applicata agli elettroni
- Un altro elemento di teoria è quello secondo cui un elettrone dotato di velocità può essere fermato immergendolo in un campo elettrico opportuno
- Complessivamente, possiamo affermare che la misura della costante di Planck si basa sul principio fondamentale della conservazione dell'energia e su un “frammento” della teoria elettromagnetica
- Quindi, ogni misura è **carica di teoria**. In generale, questi frammenti di teorie fanno parte della conoscenza considerata acquisita
- Tuttavia, il valore numerico ottenuto in una misura **non** dipende dalla teoria usata
- Infatti, una grandezza fisica può essere misurata con procedure sperimentali diverse che usano “elementi” di teorie diverse: il dato sperimentale è – prescindendo dalla maggiore o minore accuratezza – indipendente dalle teorie usate.

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite

# Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- Immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.

# Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- Immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere **plausibile**, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite. La plausibilità di una asserzione di esistenza nel Mondo aumenta in funzione del tempo.

# Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- Immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere **plausibile**, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite. La plausibilità di una asserzione di esistenza nel Mondo aumenta in funzione del tempo.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.

# Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- Immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere **plausibile**, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite. La plausibilità di una asserzione di esistenza nel Mondo aumenta in funzione del tempo.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.
- Questa tensione, produce – in alcuni casi – una situazione creativa.

# Immagini del Mondo

- Immagine **fisica** del Mondo: l'insieme delle teorie fisiche considerate come ragionevolmente acquisite
- Immagine del Mondo contenente asserzioni di esistenza nel Mondo di entità teoriche: richiede che almeno alcune delle entità teoriche usate da una teoria esistano – **plausibilmente** – nel Mondo.
- Un'asserzione di esistenza nel Mondo di una entità teorica deve essere **plausibile**, cioè deve essere compatibile con l'insieme delle conoscenze acquisite. La plausibilità di una asserzione di esistenza nel Mondo aumenta in funzione del tempo.
- Tra le due immagini del Mondo si stabilisce, sovente, una tensione.
- Questa tensione, produce – in alcuni casi – una situazione creativa.
- Esempio: i quanti di luce.

## L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.

## L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.

## L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza fisica [vedi più avanti]

## L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza fisica [vedi più avanti]
- Può essere presto dimenticata: i tubi elettrici di J. J. Thomson.

## L'invenzione di una nuova entità teorica...

- Nasce, in generale, in base all'ipotesi che questa entità teorica esista nel Mondo.
- Può segnare una svolta nella storia della fisica: i quanti di luce.
- Non a caso, questa entità teorica soddisfa i criteri di significanza fisica [vedi più avanti]
- Può essere presto dimenticata: i tubi elettrici di J. J. Thomson.
- Non a caso, questa entità teorica **NON** soddisfa i criteri di significanza [vedi più avanti]

## L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.

## L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.
- Questa ipotesi era in netto contrasto con l'immagine del Mondo ottocentesca secondo cui la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica era continua.

## L'invenzione di una nuova entità teorica: i quanti di luce

- L'ipotesi dei quanti di luce presupponeva, che, nel Mondo, l'energia della luce fosse distribuita in elementi discreti di energia “localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza”. Era quindi una ipotesi su come è fatto il Mondo e come funziona.
- Questa ipotesi era in netto contrasto con l'immagine del Mondo ottocentesca secondo cui la distribuzione spaziale dell'energia elettromagnetica era continua.
- La tensione tra descrizione ondulatoria e corpuscolare della luce ha suggerito a de Broglie di attribuire un'onda anche alle particelle dotate di massa

## Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo

# Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo
- In generale, i manuali - con omissioni o affermazioni esplicite o ambigue - favoriscono l'idea secondo cui i fenomeni si svolgono nel Mondo **esattamente** come essi sono descritti dalle nostre teorie

## Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo
- In generale, i manuali - con omissioni o affermazioni esplicite o ambigue - favoriscono l'idea secondo cui i fenomeni si svolgono nel Mondo **esattamente** come essi sono descritti dalle nostre teorie
- Questa visione epistemologica/filosofica presuppone - tra l'altro - che le entità teoriche delle nostre teorie esistano nel Mondo

## Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo
- In generale, i manuali - con omissioni o affermazioni esplicite o ambigue - favoriscono l'idea secondo cui i fenomeni si svolgono nel Mondo **esattamente** come essi sono descritti dalle nostre teorie
- Questa visione epistemologica/filosofica presuppone - tra l'altro - che le entità teoriche delle nostre teorie esistano nel Mondo
- Questo tipo di realismo è detto **realismo delle teorie**

## Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo
- In generale, i manuali - con omissioni o affermazioni esplicite o ambigue - favoriscono l'idea secondo cui i fenomeni si svolgono nel Mondo **esattamente** come essi sono descritti dalle nostre teorie
- Questa visione epistemologica/filosofica presuppone - tra l'altro - che le entità teoriche delle nostre teorie esistano nel Mondo
- Questo tipo di realismo è detto **realismo delle teorie**
- Il realismo delle teorie non è compatibile con lo sviluppo della fisica (e della scienza)

## Descrizioni della fisica e Mondo esterno. I

- Di solito, i manuali non si occupano di quali relazioni sussistano tra le descrizioni dei fenomeni e i fenomeni che si svolgono nel Mondo
- In generale, i manuali - con omissioni o affermazioni esplicite o ambigue - favoriscono l'idea secondo cui i fenomeni si svolgono nel Mondo **esattamente** come essi sono descritti dalle nostre teorie
- Questa visione epistemologica/filosofica presuppone - tra l'altro - che le entità teoriche delle nostre teorie esistano nel Mondo
- Questo tipo di realismo è detto **realismo delle teorie**
- Il realismo delle teorie non è compatibile con lo sviluppo della fisica (e della scienza)
- Per esempio. Siccome ai tempi di Maxwell, la propagazione delle onde elettromagnetiche era concepita come una deformazione meccanica dell'Etere, per il realismo delle teorie l'Etere sarebbe esistito nel Mondo. . .

# Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili

## Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili
- Imre Lakatos scriveva, parafrasando Kant: “La filosofia della scienza senza la storia della scienza è vuota; la storia della scienza senza la filosofia della scienza è cieca” [“I pensieri senza contenuto sono vuoti, le intuizioni senza concetti sono cieche”]

## Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere **criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili**
- Imre Lakatos scriveva, parafrasando Kant: **“La filosofia della scienza senza la storia della scienza è vuota; la storia della scienza senza la filosofia della scienza è cieca”** [“I pensieri senza contenuto sono vuoti, le intuizioni senza concetti sono cieche”]
- Questi criteri potrebbero essere:

# Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere **criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili**
- Imre Lakatos scriveva, parafrasando Kant: **“La filosofia della scienza senza la storia della scienza è vuota; la storia della scienza senza la filosofia della scienza è cieca”** [“I pensieri senza contenuto sono vuoti, le intuizioni senza concetti sono cieche”]
- Questi criteri potrebbero essere:
- **Criterio forte.** Una entità teorica [o una grandezza fisica] ha significato fisico se la sua eliminazione riduce la capacità predittiva della teoria

## Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere **criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili**
- Imre Lakatos scriveva, parafrasando Kant: **“La filosofia della scienza senza la storia della scienza è vuota; la storia della scienza senza la filosofia della scienza è cieca”** [“I pensieri senza contenuto sono vuoti, le intuizioni senza concetti sono cieche”]
- Questi criteri potrebbero essere:
- **Criterio forte.** Una entità teorica [o una grandezza fisica] ha significato fisico se la sua eliminazione riduce la capacità predittiva della teoria
- **Criterio debole.** Una entità teorica [o una grandezza fisica] ha significato fisico se la sua eliminazione riduce la capacità descrittiva o euristica della teoria

# Come si valuta una teoria

- È quindi necessario assumere **criteri di valutazione delle teorie che siano rigidi epistemologicamente ma storicamente flessibili**
- Imre Lakatos scriveva, parafrasando Kant: **“La filosofia della scienza senza la storia della scienza è vuota; la storia della scienza senza la filosofia della scienza è cieca”** [“I pensieri senza contenuto sono vuoti, le intuizioni senza concetti sono cieche”]
- Questi criteri potrebbero essere:
- **Criterio forte.** Una entità teorica [o una grandezza fisica] ha significato fisico se la sua eliminazione riduce la capacità predittiva della teoria
- **Criterio debole.** Una entità teorica [o una grandezza fisica] ha significato fisico se la sua eliminazione riduce la capacità descrittiva o euristica della teoria
- Questi criteri possono essere applicati anche a sub - teorie [vedi più avanti]

## Come si valuta una teoria. II

- Questi criteri sono una rielaborazione di quello adottato da Heinrich Hertz che scriveva:  
“Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell *eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno*”

## Come si valuta una teoria. II

- Questi criteri sono una rielaborazione di quello adottato da Heinrich Hertz che scriveva:  
“Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell *eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno*”
- Primo esempio. In base al criterio forte, l'Etere aveva significato fisico ai tempi di Maxwell. Ora non lo ha più

## Come si valuta una teoria. II

- Questi criteri sono una rielaborazione di quello adottato da Heinrich Hertz che scriveva:  
“Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell *eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno*”
- Primo esempio. In base al criterio forte, l'Etere aveva significato fisico ai tempi di Maxwell. Ora non lo ha più
- La relatività speciale può essere sviluppata - ed è stata sviluppata da Einstein - senza usare lo spazio - tempo. Quindi lo spazio - tempo non soddisfa il criterio forte. Ma ...

## Come si valuta una teoria. II

- Questi criteri sono una rielaborazione di quello adottato da Heinrich Hertz che scriveva:  
“Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell *eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno*”
- Primo esempio. In base al criterio forte, l'Etere aveva significato fisico ai tempi di Maxwell. Ora non lo ha più
- La relatività speciale può essere sviluppata - ed è stata sviluppata da Einstein - senza usare lo spazio - tempo. Quindi lo spazio - tempo non soddisfa il criterio forte. Ma ...
- Lo spazio - tempo soddisfa il criterio debole

## Come si valuta una teoria. II

- Questi criteri sono una rielaborazione di quello adottato da Heinrich Hertz che scriveva:  
“Mi sono pertanto sforzato di sviluppare in modo coerente le concezioni fisiche necessarie, partendo dalle equazioni di Maxwell, ma cercando d'altra parte di semplificare al massimo la teoria di Maxwell *eliminando o semplicemente non prendendo in considerazione quelle parti che possono essere tralasciate in quanto non possono influire su alcun possibile fenomeno*”
- Primo esempio. In base al criterio forte, l'Etere aveva significato fisico ai tempi di Maxwell. Ora non lo ha più
- La relatività speciale può essere sviluppata - ed è stata sviluppata da Einstein - senza usare lo spazio - tempo. Quindi lo spazio - tempo non soddisfa il criterio forte. Ma ...
- Lo spazio - tempo soddisfa il criterio debole
- Infatti, la sua eliminazione riduce la capacità descrittiva ed euristica della teoria  $\Rightarrow$  relatività generale

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire previsioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire previsioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire previsioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No
- Infatti, l'adeguatezza di una teoria è stabilita quando la teoria è accettata dalla comunità scientifica competente

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No
- Infatti, l'adeguatezza di una teoria è stabilita quando la teoria è accettata dalla comunità scientifica competente
- L'accettazione di una teoria non è **per sempre**. Essa può essere revocata sulla base di nuovi dati sperimentali

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No
- Infatti, l'adeguatezza di una teoria è stabilita quando la teoria è accettata dalla comunità scientifica competente
- L'accettazione di una teoria non è **per sempre**. Essa può essere revocata sulla base di nuovi dati sperimentali
- Ogni teoria fisica ha un dominio di applicazione limitato, dominio in cui è **adeguata**

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No
- Infatti, l'adeguatezza di una teoria è stabilita quando la teoria è accettata dalla comunità scientifica competente
- L'accettazione di una teoria non è **per sempre**. Essa può essere revocata sulla base di nuovi dati sperimentali
- Ogni teoria fisica ha un dominio di applicazione limitato, dominio in cui è **adeguata**
- Fuori da questo dominio, la teoria **non è adeguata**

## In sintesi

- La funzione fondamentale delle teorie fisiche è quella di fornire predizioni sui possibili valori che una grandezza fisica può assumere
- Il concetto di vero non è adatto ad una teoria fisica
- Una teoria fisica può essere solo **adeguata** o **non adeguata**
- Una teoria fisica è **adeguata** se **tutte** le sue predizioni sono in accordo con l'esperimento
- L'adeguatezza di una teoria, cioè di accordo con l'esperimento, non è un criterio logico del tipo Sì/No
- Infatti, l'adeguatezza di una teoria è stabilita quando la teoria è accettata dalla comunità scientifica competente
- L'accettazione di una teoria non è **per sempre**. Essa può essere revocata sulla base di nuovi dati sperimentali
- Ogni teoria fisica ha un dominio di applicazione limitato, dominio in cui è **adeguata**
- Fuori da questo dominio, la teoria **non è adeguata**
- Tuttavia, possiamo dire che una teoria è **falsificata** se almeno una sua predizione è smentita dall'esperimento

# Il ruolo della epistemologia nell'insegnamento

- In genere, i manuali e le pratiche di insegnamento tendono a richiamare situazioni di vita quotidiana e le esperienze sensoriali degli studenti

# Il ruolo della epistemologia nell'insegnamento

- In genere, i manuali e le pratiche di insegnamento tendono a richiamare situazioni di vita quotidiana e le esperienze sensoriali degli studenti
- Questa tendenza, se non bilanciata da una argomentata illustrazione del ruolo, della natura e dello scopo delle teorie fisiche e del loro rapporto con la realtà del Mondo rende poi difficile l'assimilazione di concetti astratti come quello di campo

# Il ruolo della epistemologia nell'insegnamento

- In genere, i manuali e le pratiche di insegnamento tendono a richiamare situazioni di vita quotidiana e le esperienze sensoriali degli studenti
- Questa tendenza, se non bilanciata da una argomentata illustrazione del ruolo, della natura e dello scopo delle teorie fisiche e del loro rapporto con la realtà del Mondo rende poi difficile l'assimilazione di concetti astratti come quello di campo
- Come si concilia la difficoltà degli studenti ad acquisire il concetto di campo con il fatto che gli stessi studenti a partire dal terzo anno - entrano in contatto con concetti ancora più astratti nel corso di **Storia** della Filosofia?

# Il ruolo della epistemologia nell'insegnamento

- In genere, i manuali e le pratiche di insegnamento tendono a richiamare situazioni di vita quotidiana e le esperienze sensoriali degli studenti
- Questa tendenza, se non bilanciata da una argomentata illustrazione del ruolo, della natura e dello scopo delle teorie fisiche e del loro rapporto con la realtà del Mondo rende poi difficile l'assimilazione di concetti astratti come quello di campo
- Come si concilia la difficoltà degli studenti ad acquisire il concetto di campo con il fatto che gli stessi studenti a partire dal terzo anno - entrano in contatto con concetti ancora più astratti nel corso di **Storia** della Filosofia?
- È verosimile che questa difficoltà sia – in realtà – largamente dovuta ad una pratica didattica che ignora o trascura il ruolo essenziale dell'astrazione che culmina nella formulazione di una teoria fisica?

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.
- Abituare gli studenti alla necessità/opportunità di una trattazione macroscopica e di una trattazione microscopica dei fenomeni elettromagnetici

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.
- Abituare gli studenti alla necessità/opportunità di una trattazione macroscopica e di una trattazione microscopica dei fenomeni elettromagnetici
- Presentare sin dall'inizio il fatto che una carica elettrica puntiforme genera - in generale - un campo elettrico ed un campo magnetico

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.
- Abituare gli studenti alla necessità/opportunità di una trattazione macroscopica e di una trattazione microscopica dei fenomeni elettromagnetici
- Presentare sin dall'inizio il fatto che una carica elettrica puntiforme genera - in generale - un campo elettrico ed un campo magnetico
- **Valutare** se affermare che, per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.
- Abituare gli studenti alla necessità/opportunità di una trattazione macroscopica e di una trattazione microscopica dei fenomeni elettromagnetici
- Presentare sin dall'inizio il fatto che una carica elettrica puntiforme genera - in generale - un campo elettrico ed un campo magnetico
- **Valutare** se affermare che, per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

- ... e un campo magnetico

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo?

- Introdurre il concetto di campo a partire dall'interazione gravitazionale - Lineamenti di relatività speciale durante la trattazione della meccanica
- Chiarire sin dall'inizio la natura discreta della materia e sottolineare il compromesso necessario per descrivere questa natura discreta con funzioni matematiche continue. Esempio: densità di carica.
- Abituare gli studenti alla necessità/opportunità di una trattazione macroscopica e di una trattazione microscopica dei fenomeni elettromagnetici
- Presentare sin dall'inizio il fatto che una carica elettrica puntiforme genera - in generale - un campo elettrico ed un campo magnetico
- **Valutare** se affermare che, per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

- ... e un campo magnetico

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

- In ogni caso scrivere, sin dall'inizio,  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B})$

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? II

- La trattazione dell'induzione elettromagnetica dovrebbe essere svolta avendo come punti di riferimento:

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? II

- La trattazione dell'induzione elettromagnetica dovrebbe essere svolta avendo come punti di riferimento:
- Gli esperimenti di Faraday e la sua teoria locale

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? II

- La trattazione dell'induzione elettromagnetica dovrebbe essere svolta avendo come punti di riferimento:
- Gli esperimenti di Faraday e la sua teoria locale
- La definizione della fem indotta come

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? II

- La trattazione dell'induzione elettromagnetica dovrebbe essere svolta avendo come punti di riferimento:
- Gli esperimenti di Faraday e la sua teoria locale
- La definizione della fem indotta come

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

- La necessità di usare una descrizione locale. . .

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? II

- La trattazione dell'induzione elettromagnetica dovrebbe essere svolta avendo come punti di riferimento:
- Gli esperimenti di Faraday e la sua teoria locale
- La definizione della fem indotta come

$$\mathcal{E} = \oint (\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

- La necessità di usare una descrizione locale. . .
- . . . che implica l'introduzione del potenziale vettore [vedi la presentazione sull'induzione elettromagnetica]
- La critica della “regola del flusso”

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? III

- Questo approccio deve essere preceduto/accompagnato da una ricognizione storica che ponga in evidenza che:

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? III

- Questo approccio deve essere preceduto/accompagnato da una ricognizione storica che ponga in evidenza che:
- 1 - L'elettromagnetismo si è sviluppato nel corso dell'Ottocento all'interno di una concezione continua della materia: questa concezione prevedeva la presenza dell'Etere

## Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? III

- Questo approccio deve essere preceduto/accompagnato da una ricognizione storica che ponga in evidenza che:
- 1 - L'elettromagnetismo si è sviluppato nel corso dell'Ottocento all'interno di una concezione continua della materia: questa concezione prevedeva la presenza dell'Etere
- 2 - La natura discreta della materia è stata pienamente riconosciuta solo nel Novecento

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? III

- Questo approccio deve essere preceduto/accompagnato da una ricognizione storica che ponga in evidenza che:
- 1 - L'elettromagnetismo si è sviluppato nel corso dell'Ottocento all'interno di una concezione continua della materia: questa concezione prevedeva la presenza dell'Etere
- 2 - La natura discreta della materia è stata pienamente riconosciuta solo nel Novecento
- 3 - Nella prima fase dello sviluppo era dominante la concezione dell'azione a distanza caratterizzata – inoltre – dalla convinzione che le forze tra due elementi di materia (per esempio, elementi di fili percorsi da corrente) era di tipo newtoniano cioè dirette lungo la congiungente i due elementi (Ampère)

# Un nuovo approccio all'elettromagnetismo? III

- Questo approccio deve essere preceduto/accompagnato da una ricognizione storica che ponga in evidenza che:
- 1 - L'elettromagnetismo si è sviluppato nel corso dell'Ottocento all'interno di una concezione continua della materia: questa concezione prevedeva la presenza dell'Etere
- 2 - La natura discreta della materia è stata pienamente riconosciuta solo nel Novecento
- 3 - Nella prima fase dello sviluppo era dominante la concezione dell'azione a distanza caratterizzata – inoltre – dalla convinzione che le forze tra due elementi di materia (per esempio, elementi di fili percorsi da corrente) era di tipo newtoniano cioè dirette lungo la congiungente i due elementi (Ampère)
- 4 - L'introduzione del concetto di campo è dovuta a Faraday e Maxwell

# Le equazioni di Maxwell. I

Quasi tutti i manuali adottati nelle Scuole Secondarie Superiori scrivono le **equazioni di Maxwell in forma integrale**.

La dizione “**equazioni di Maxwell in forma integrale**” è un ossimoro. Infatti, le equazioni di Maxwell sono equazioni differenziali che obbediscono al principio di località. La loro forma integrale non soddisfa questo principio. Infine, questa forma rende la propagazione delle onde elettromagnetiche **un profondo mistero**.

Se partiamo da questa premessa, abbiamo solo due soluzioni praticabili. Descrivere le equazioni di Maxwell e le loro implicazioni a parole; oppure scrivere le equazioni di Maxwell, illustrarle e discutere le loro implicazioni.

# Le quattro equazioni di Maxwell

- La prima equazione connette una variazione spaziale [divergenza] del campo elettrico alla densità di carica

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \right]$$

# Le quattro equazioni di Maxwell

- La prima equazione connette una variazione spaziale [divergenza] del campo elettrico alla densità di carica

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \right]$$

- La seconda equazione afferma che la stessa variazione spaziale [divergenza] del campo magnetico è nulla

$$\left[ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \right]$$

# Le quattro equazioni di Maxwell

- La prima equazione connette una variazione spaziale [divergenza] del campo elettrico alla densità di carica

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \right]$$

- La seconda equazione afferma che la stessa variazione spaziale [divergenza] del campo magnetico è nulla

$$\left[ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \right]$$

- La terza equazione connette un altro tipo di variazione spaziale [rotore] del campo elettrico alla variazione temporale del campo magnetico

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right]$$

# Le quattro equazioni di Maxwell

- La prima equazione connette una variazione spaziale [divergenza] del campo elettrico alla densità di carica

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \right]$$

- La seconda equazione afferma che la stessa variazione spaziale [divergenza] del campo magnetico è nulla

$$\left[ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \right]$$

- La terza equazione connette un altro tipo di variazione spaziale [rotore] del campo elettrico alla variazione temporale del campo magnetico

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right]$$

- Infine la quarta equazione connette lo stesso tipo di variazione spaziale [rotore] del campo magnetico alla variazione temporale del campo elettrico

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \right]$$

## Sulla quarta equazione di Maxwell...

- Nella pagina precedente, sono state scritte in rosso le sorgenti  $\rho$  e  $\vec{J}$  del campo elettromagnetico

## Sulla quarta equazione di Maxwell...

- Nella pagina precedente, sono state scritte in rosso le sorgenti  $\rho$  e  $\vec{J}$  del campo elettromagnetico
- Al secondo membro della quarta equazione compare – sommato a  $\vec{J}$  – il termine  $\varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$

## Sulla quarta equazione di Maxwell...

- Nella pagina precedente, sono state scritte in rosso le sorgenti  $\rho$  e  $\vec{J}$  del campo elettromagnetico
- Al secondo membro della quarta equazione compare – sommato a  $\vec{J}$  – il termine  $\epsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$
- Questo termine è denominato in letteratura come “densità di corrente di spostamento” ed è interpretato dicendo che, al pari di  $\vec{J}$ , esso genera (causa) un campo magnetico

## Sulla quarta equazione di Maxwell...

- Nella pagina precedente, sono state scritte in rosso le sorgenti  $\rho$  e  $\vec{J}$  del campo elettromagnetico
- Al secondo membro della quarta equazione compare – sommato a  $\vec{J}$  – il termine  $\varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$
- Questo termine è denominato in letteratura come “densità di corrente di spostamento” ed è interpretato dicendo che, al pari di  $\vec{J}$ , esso genera (causa) un campo magnetico
- Questa interpretazione causale è incompatibile con quella secondo cui il campo magnetico è generato (causato) dalle sorgenti  $\vec{J}$

## Un esempio illuminante: il condensatore

- Consideriamo un condensatore carico le cui armature siano – per semplicità di calcolo – circolari

## Un esempio illuminante: il condensatore

- Consideriamo un condensatore carico le cui armature siano – per semplicità di calcolo – circolari
- Durante la scarica del condensatore, tra le armature del condensatore compare un campo magnetico: **esso è dovuto alle correnti radiali delle armature circolari ed alla corrente che percorre il filo che connette le due armature**

## Un esempio illuminante: il condensatore

- Consideriamo un condensatore carico le cui armature siano – per semplicità di calcolo – circolari
- Durante la scarica del condensatore, tra le armature del condensatore compare un campo magnetico: **esso è dovuto alle correnti radiali delle armature circolari ed alla corrente che percorre il filo che connette le due armature**
- Il campo magnetico in un punto tra le armature si ottiene calcolando innanzitutto il potenziale vettore in quel punto, nell'approssimazione di correnti lentamente variabili e distanze  $r_{21}$  sufficientemente piccole, trascurando cioè il termine di ritardo  $r_{21}/c$ , e scrivendo poi  $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$

## Un esempio illuminante: il condensatore

- Consideriamo un condensatore carico le cui armature siano – per semplicità di calcolo – circolari
- Durante la scarica del condensatore, tra le armature del condensatore compare un campo magnetico: **esso è dovuto alle correnti radiali delle armature circolari ed alla corrente che percorre il filo che connette le due armature**
- Il campo magnetico in un punto tra le armature si ottiene calcolando innanzitutto il potenziale vettore in quel punto, nell'approssimazione di correnti lentamente variabili e distanze  $r_{21}$  sufficientemente piccole, trascurando cioè il termine di ritardo  $r_{21}/c$ , e scrivendo poi  $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$
- Questa derivazione può essere interpretata causalmente in modo corretto: le correnti generano il campo magnetico

## Tuttavia...

- Considerando lo stesso condensatore, il campo magnetico in un punto interno al condensatore, la cui distanza dall'asse del condensatore è  $r$ , obbedisce all'equazione:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B2\pi r = \int_S \text{rot}\vec{B} \cdot \hat{n} dS = \varepsilon_0\mu_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS = \mu_0 I_c \frac{r^2}{R^2}$$

## Tuttavia...

- Considerando lo stesso condensatore, il campo magnetico in un punto interno al condensatore, la cui distanza dall'asse del condensatore è  $r$ , obbedisce all'equazione:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B2\pi r = \int_S \text{rot}\vec{B} \cdot \hat{n} dS = \varepsilon_0\mu_0 \int_S \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS = \mu_0 I_c \frac{r^2}{R^2}$$

- Perché  $\vec{J} = 0$  all'interno del condensatore e  $\vec{E} = (\sigma/\varepsilon_0)\hat{n}$

## Tuttavia...

- Considerando lo stesso condensatore, il campo magnetico in un punto interno al condensatore, la cui distanza dall'asse del condensatore è  $r$ , obbedisce all'equazione:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B2\pi r = \int_S \text{rot}\vec{B} \cdot \hat{n} dS = \varepsilon_0\mu_0 \int_S \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS = \mu_0 I_c \frac{r^2}{R^2}$$

- Perché  $\vec{J} = 0$  all'interno del condensatore e  $\vec{E} = (\sigma/\varepsilon_0)\hat{n}$
- Pertanto:

$$B = \mu_0 I_c \frac{r}{2\pi R^2}$$

## Tuttavia...

- Considerando lo stesso condensatore, il campo magnetico in un punto interno al condensatore, la cui distanza dall'asse del condensatore è  $r$ , obbedisce all'equazione:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B2\pi r = \int_S \text{rot}\vec{B} \cdot \hat{n} dS = \varepsilon_0\mu_0 \int_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS = \mu_0 I_c \frac{r^2}{R^2}$$

- Perché  $\vec{J} = 0$  all'interno del condensatore e  $\vec{E} = (\sigma/\varepsilon_0)\hat{n}$
- Pertanto:

$$B = \mu_0 I_c \frac{r}{2\pi R^2}$$

- Questa formula – che coincide con quella che si sarebbe ottenuta sviluppando i calcoli della pagina precedente – non può essere interpretata causalmente

# Discussione riservata ai docenti

- Nelle equazioni di Maxwell è implicita la conservazione della carica elettrica

# Discussione riservata ai docenti

- Nelle equazioni di Maxwell è implicita la conservazione della carica elettrica
- Infatti: applicando l'operatore divergenza alla quarta equazione e tenendo conto della prima equazione, si ottiene:

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

## Discussione riservata ai docenti

- Nelle equazioni di Maxwell è implicita la conservazione della carica elettrica
- Infatti: applicando l'operatore divergenza alla quarta equazione e tenendo conto della prima equazione, si ottiene:

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

- che, integrata sul volume  $\tau$ , dà, usando il teorema della divergenza:

$$\int_{\tau} \operatorname{div} \vec{J} d\tau = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = - \int_{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau = -\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho d\tau = -\frac{dQ}{dt}$$

ove  $Q$  è la carica contenuta nel volume  $\tau$  all'istante  $t$

## Discussione riservata ai docenti

- Nelle equazioni di Maxwell è implicita la conservazione della carica elettrica
- Infatti: applicando l'operatore divergenza alla quarta equazione e tenendo conto della prima equazione, si ottiene:

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

- che, integrata sul volume  $\tau$ , dà, usando il teorema della divergenza:

$$\int_{\tau} \operatorname{div} \vec{J} d\tau = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = - \int_{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau = - \frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho d\tau = - \frac{dQ}{dt}$$

ove  $Q$  è la carica contenuta nel volume  $\tau$  all'istante  $t$

- Cioè: il flusso della carica attraverso la superficie  $S$  nell'unità di tempo – all'istante  $t$  – è uguale alla variazione, cambiata di segno, della carica totale contenuta nel volume  $\tau$  allo stesso istante  $t$ ; **la carica si conserva.**

## Discussione riservata ai docenti

- Nelle equazioni di Maxwell è implicita la conservazione della carica elettrica
- Infatti: applicando l'operatore divergenza alla quarta equazione e tenendo conto della prima equazione, si ottiene:

$$\operatorname{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

- che, integrata sul volume  $\tau$ , dà, usando il teorema della divergenza:

$$\int_{\tau} \operatorname{div} \vec{J} d\tau = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dS = - \int_{\tau} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau = -\frac{d}{dt} \int_{\tau} \rho d\tau = -\frac{dQ}{dt}$$

ove  $Q$  è la carica contenuta nel volume  $\tau$  all'istante  $t$

- Cioè: il flusso della carica attraverso la superficie  $S$  nell'unità di tempo – all'istante  $t$  – è uguale alla variazione, cambiata di segno, della carica totale contenuta nel volume  $\tau$  allo stesso istante  $t$ ; **la carica si conserva**.
- Si noti come l'equazione della conservazione della carica in forma integrale esprima una proprietà dell'entità teorica "carica": tra i due membri dell'equazione non è possibile stabilire alcuna connessione causale, perché essi riguardano la stessa grandezza fisica

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- In questo caso il flusso del campo elettrico attraverso la superficie  $S$  all'istante  $t$  è connesso all'integrale sul volume  $\tau$  limitato dalla superficie  $S$  della densità di carica allo stesso istante

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- In questo caso il flusso del campo elettrico attraverso la superficie  $S$  all'istante  $t$  è connesso all'integrale sul volume  $\tau$  limitato dalla superficie  $S$  della densità di carica allo stesso istante
- Siccome il campo elettrico in ogni punto della superficie  $S$  dovrebbe essere prodotto dalle cariche contenute nel volume  $\tau$  a istanti ritardati, **questa equazione vale solo se la densità di carica  $\rho$  non dipende dal tempo...**

## Discussione riservata ai docenti

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- In questo caso il flusso del campo elettrico attraverso la superficie  $S$  all'istante  $t$  è connesso all'integrale sul volume  $\tau$  limitato dalla superficie  $S$  della densità di carica allo stesso istante
- Siccome il campo elettrico in ogni punto della superficie  $S$  dovrebbe essere prodotto dalle cariche contenute nel volume  $\tau$  a istanti ritardati, **questa equazione vale solo se la densità di carica  $\rho$  non dipende dal tempo...**
- ... **Possiamo chiamare questa equazione “prima equazione di Maxwell in forma integrale?”**

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- In questo caso il flusso del campo elettrico attraverso la superficie  $S$  all'istante  $t$  è connesso all'integrale sul volume  $\tau$  limitato dalla superficie  $S$  della densità di carica allo stesso istante
- Siccome il campo elettrico in ogni punto della superficie  $S$  dovrebbe essere prodotto dalle cariche contenute nel volume  $\tau$  a istanti ritardati, **questa equazione vale solo se la densità di carica  $\rho$  non dipende dal tempo...**
- ... **Possiamo chiamare questa equazione “prima equazione di Maxwell in forma integrale?”**
- Evidentemente **NO**

## Discussione riservata ai docenti

- Una situazione completamente diversa è rappresentata dall'integrale della prima equazione di Maxwell

$$\int_S \vec{E}(x, y, z, t) \cdot \hat{n} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{\tau} \rho(x, y, z, t) d\tau$$

- In questo caso il flusso del campo elettrico attraverso la superficie  $S$  all'istante  $t$  è connesso all'integrale sul volume  $\tau$  limitato dalla superficie  $S$  della densità di carica allo stesso istante
- Siccome il campo elettrico in ogni punto della superficie  $S$  dovrebbe essere prodotto dalle cariche contenute nel volume  $\tau$  a istanti ritardati, **questa equazione vale solo se la densità di carica  $\rho$  non dipende dal tempo...**
- ... **Possiamo chiamare questa equazione “prima equazione di Maxwell in forma integrale?”**
- Evidentemente **NO**
- Si osservi che i campi ritardati emergono tenendo conto di **tutte** le equazioni di Maxwell

## Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

- Se le sorgenti del campo EM sono nulle in tutti i punti dello spazio, le equazioni di Maxwell assumono una forma più semplice:

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = 0 \right]$$

$$\left[ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \right]$$

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right]$$

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right]$$

## Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

- Se le sorgenti del campo EM sono nulle in tutti i punti dello spazio, le equazioni di Maxwell assumono una forma più semplice:

$$\left[ \operatorname{div} \vec{E} = 0 \right]$$

$$\left[ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \right]$$

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right]$$

$$\left[ \operatorname{rot} \vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right]$$

- È inoltre possibile ottenere due equazioni identiche, una per il campo elettrico ed una per il campo magnetico. . .

# Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

## Nota. Questa pagina è opzionale

- ... Infatti, applicando l'operatore rotore alla terza equazione (in assenza di sorgenti) ed usando la quarta equazione, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

# Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

## Nota. Questa pagina è opzionale

- ... Infatti, applicando l'operatore rotore alla terza equazione (in assenza di sorgenti) ed usando la quarta equazione, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

- Procedendo in modo analogo per il campo magnetico, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

# Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

## Nota. Questa pagina è opzionale

- ... Infatti, applicando l'operatore rotore alla terza equazione (in assenza di sorgenti) ed usando la quarta equazione, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

- Procedendo in modo analogo per il campo magnetico, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

- Queste equazioni sono le equazioni delle onde di d'Alembert per il campo elettrico e per il campo magnetico, con la particolarità che la velocità di propagazione del campo elettromagnetico è quella della luce nel vuoto: la luce può quindi essere descritta come un'onda elettromagnetica

# Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

## Nota. Questa pagina è opzionale

- ... Infatti, applicando l'operatore rotore alla terza equazione (in assenza di sorgenti) ed usando la quarta equazione, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

- Procedendo in modo analogo per il campo magnetico, si ottiene:

$$\nabla^2 \vec{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

- Queste equazioni sono le equazioni delle onde di d'Alembert per il campo elettrico e per il campo magnetico, con la particolarità che la velocità di propagazione del campo elettromagnetico è quella della luce nel vuoto: la luce può quindi essere descritta come un'onda elettromagnetica
- Si tenga presente che queste equazioni descrivono la propagazione del campo EM nel vuoto senza occuparsi di **dove e da chi** il campo EM sia stato prodotto

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

**Premessa.** Il termine “onda” richiama l’idea di una variazione periodica di una grandezza fisica che si propaga. Tuttavia, sinché non prenderemo in considerazione fenomeni periodici, il termine “onda elettromagnetica” deve essere inteso come “**propagazione di un segnale elettromagnetico**”

- Una sua soluzione è data da:  $f_1 = f_1(x - ct)$ , come si può verificare sostituendo la  $f_1 = f_1(x - ct)$  nell’equazione delle onde

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

**Premessa.** Il termine “onda” richiama l'idea di una variazione periodica di una grandezza fisica che si propaga. Tuttavia, sinché non prenderemo in considerazione fenomeni periodici, il termine “onda elettromagnetica” deve essere inteso come “**propagazione di un segnale elettromagnetico**”

- Una sua soluzione è data da:  $f_1 = f_1(x - ct)$ , come si può verificare sostituendo la  $f_1 = f_1(x - ct)$  nell'equazione delle onde
- L'unica condizione cui deve soddisfare la  $f_1$  è che essa deve essere una funzione dell'argomento  $(x - ct)$

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

**Premessa.** Il termine “onda” richiama l'idea di una variazione periodica di una grandezza fisica che si propaga. Tuttavia, sinché non prenderemo in considerazione fenomeni periodici, il termine “onda elettromagnetica” deve essere inteso come “**propagazione di un segnale elettromagnetico**”

- Una sua soluzione è data da:  $f_1 = f_1(x - ct)$ , come si può verificare sostituendo la  $f_1 = f_1(x - ct)$  nell'equazione delle onde
- L'unica condizione cui deve soddisfare la  $f_1$  è che essa deve essere una funzione dell'argomento  $(x - ct)$
- La relazione  $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$  è condizione necessaria e sufficiente affinché, qualunque sia l'espressione analitica di  $f_1$ , si abbia:

$$f_1(x_2, t_2) = f_1(x_1, t_1)$$

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

**Premessa.** Il termine “onda” richiama l'idea di una variazione periodica di una grandezza fisica che si propaga. Tuttavia, sinché non prenderemo in considerazione fenomeni periodici, il termine “onda elettromagnetica” deve essere inteso come “**propagazione di un segnale elettromagnetico**”

- Una sua soluzione è data da:  $f_1 = f_1(x - ct)$ , come si può verificare sostituendo la  $f_1 = f_1(x - ct)$  nell'equazione delle onde
- L'unica condizione cui deve soddisfare la  $f_1$  è che essa deve essere una funzione dell'argomento  $(x - ct)$
- La relazione  $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$  è condizione necessaria e sufficiente affinché, qualunque sia l'espressione analitica di  $f_1$ , si abbia:

$$f_1(x_2, t_2) = f_1(x_1, t_1)$$

- dove  $(x_1, t_1)$  e  $(x_2, t_2)$  sono due coppie di variabili arbitrariamente scelte

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

**Premessa.** Il termine “onda” richiama l'idea di una variazione periodica di una grandezza fisica che si propaga. Tuttavia, sinché non prenderemo in considerazione fenomeni periodici, il termine “onda elettromagnetica” deve essere inteso come “**propagazione di un segnale elettromagnetico**”

- Una sua soluzione è data da:  $f_1 = f_1(x - ct)$ , come si può verificare sostituendo la  $f_1 = f_1(x - ct)$  nell'equazione delle onde
- L'unica condizione cui deve soddisfare la  $f_1$  è che essa deve essere una funzione dell'argomento  $(x - ct)$
- La relazione  $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$  è condizione necessaria e sufficiente affinché, qualunque sia l'espressione analitica di  $f_1$ , si abbia:

$$f_1(x_2, t_2) = f_1(x_1, t_1)$$

- dove  $(x_1, t_1)$  e  $(x_2, t_2)$  sono due coppie di variabili arbitrariamente scelte
- Questa proprietà della  $f_1(x - ct)$  caratterizza il concetto di onda [elettromagnetica]: il valore che la funzione assume all'istante  $t_2$  nel punto  $x_2$  è lo stesso che la funzione aveva all'istante precedente  $t_1$  nel punto  $x_1$  la cui distanza da  $x_2$  è pari a  $c(t_2 - t_1)$

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

- Anche la funzione  $f_2(x + ct)$  è una soluzione dell'equazione

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

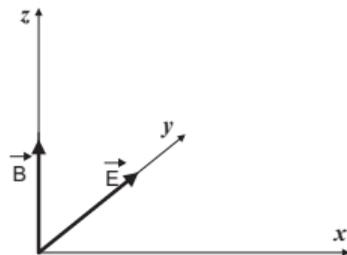
- Anche la funzione  $f_2(x + ct)$  è una soluzione dell'equazione
- Mentre la  $f_1(x - ct)$  descrive la propagazione di un'onda lungo la direzione positiva delle  $x$ , la  $f_2(x + ct)$  descrive un'onda elettromagnetica che si propaga lungo la direzione negativa dell'asse  $x$

# Soluzioni della equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche in assenza di sorgenti

- Anche la funzione  $f_2(x + ct)$  è una soluzione dell'equazione
- Mentre la  $f_1(x - ct)$  descrive la propagazione di un'onda lungo la direzione positiva delle  $x$ , la  $f_2(x + ct)$  descrive un'onda elettromagnetica che si propaga lungo la direzione negativa dell'asse  $x$
- Anche qualunque combinazione lineare di  $f_1(x - ct)$  e  $f_2(x + ct)$  è una soluzione dell'equazione monodimensionale delle onde elettromagnetiche

# Il campo elettromagnetico di un'onda piana

Analizzando in dettaglio il caso di un'onda elettromagnetica piana che si propaga lungo la direzione positiva dell'asse  $x$ , si verifica che:  $E_x = 0$ ;  $B_x = 0$



$$\vec{B} = \hat{x} \times \frac{\vec{E}}{c}$$

Per comodità di rappresentazione si è posto – nella figura –  $c = 1$

In un'onda piana, il campo elettrico e il campo magnetico hanno lo stesso valore in ogni punto di un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, scelto arbitrariamente: ognuno di questi piani è chiamato “fronte dell'onda”

## Onde piane periodiche

- Quando i campi di un segnale elettromagnetico piano dipendono sinusoidalmente dal tempo, l'espressione della componente del campo elettrico lungo l'asse  $y$  assume la forma:

$$E_y = E_{y_0} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right) = E_{y_0} \sin (kx - \omega t)$$

## Onde piane periodiche

- Quando i campi di un segnale elettromagnetico piano dipendono sinusoidalmente dal tempo, l'espressione della componente del campo elettrico lungo l'asse  $y$  assume la forma:

$$E_y = E_{y0} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right) = E_{y0} \sin (kx - \omega t)$$

- dove  $\nu$  è la frequenza della funzione sinusoidale,  $\lambda = c/\nu$  è la lunghezza d'onda e  $k = 2\pi/\lambda$  è il modulo del vettore d'onda diretto lungo la direzione di propagazione

## Onde piane periodiche

- Quando i campi di un segnale elettromagnetico piano dipendono sinusoidalmente dal tempo, l'espressione della componente del campo elettrico lungo l'asse  $y$  assume la forma:

$$E_y = E_{y0} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right) = E_{y0} \sin (kx - \omega t)$$

- dove  $\nu$  è la frequenza della funzione sinusoidale,  $\lambda = c/\nu$  è la lunghezza d'onda e  $k = 2\pi/\lambda$  è il modulo del vettore d'onda diretto lungo la direzione di propagazione
- Si noti che: fissato  $x$ ,  $E_y$  varia sinusoidalmente in funzione di  $t$  con periodo  $T = 1/\nu$ ; fissato  $t$ ,  $E_y$  varia sinusoidalmente in funzione di  $x$  con periodo spaziale (lunghezza d'onda)  $\lambda$

## Onde piane periodiche

- Quando i campi di un segnale elettromagnetico piano dipendono sinusoidalmente dal tempo, l'espressione della componente del campo elettrico lungo l'asse  $y$  assume la forma:

$$E_y = E_{y0} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \nu t \right) = E_{y0} \sin (kx - \omega t)$$

- dove  $\nu$  è la frequenza della funzione sinusoidale,  $\lambda = c/\nu$  è la lunghezza d'onda e  $k = 2\pi/\lambda$  è il modulo del vettore d'onda diretto lungo la direzione di propagazione
- Si noti che: fissato  $x$ ,  $E_y$  varia sinusoidalmente in funzione di  $t$  con periodo  $T = 1/\nu$ ; fissato  $t$ ,  $E_y$  varia sinusoidalmente in funzione di  $x$  con periodo spaziale (lunghezza d'onda)  $\lambda$
- Un'onda con il vettore campo elettrico sempre diretto lungo la medesima direzione si dice polarizzata linearmente lungo questa direzione

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica
- È possibile scrivere l'espressione del campo elettromagnetico generato da una carica puntiforme in moto qualunque

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica
- È possibile scrivere l'espressione del campo elettromagnetico generato da una carica puntiforme in moto qualunque
- Se, all'inizio, sono state presentate queste equazioni nel limite di velocità piccole e lentamente variabili, queste equazioni debbono essere richiamate qui:

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica
- È possibile scrivere l'espressione del campo elettromagnetico generato da una carica puntiforme in moto qualunque
- Se, all'inizio, sono state presentate queste equazioni nel limite di velocità piccole e lentamente variabili, queste equazioni debbono essere richiamate qui:
- Per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica
- È possibile scrivere l'espressione del campo elettromagnetico generato da una carica puntiforme in moto qualunque
- Se, all'inizio, sono state presentate queste equazioni nel limite di velocità piccole e lentamente variabili, queste equazioni debbono essere richiamate qui:
- Per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

- ... e un campo magnetico

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

# Le equazioni di Maxwell in presenza di sorgenti

Operando sul sistema delle equazioni di Maxwell, si dimostra, tra l'altro, che:

- Il campo elettromagnetico generato da una distribuzione di cariche contenuta in un volume finito, si propaga con una velocità  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ . Questa velocità è la stessa in ogni SRI
- La luce può essere descritta come un'onda elettromagnetica
- È possibile scrivere l'espressione del campo elettromagnetico generato da una carica puntiforme in moto qualunque
- Se, all'inizio, sono state presentate queste equazioni nel limite di velocità piccole e lentamente variabili, queste equazioni debbono essere richiamate qui:
- Per velocità della carica puntiforme  $Q$  piccole rispetto a  $c$  e variabili lentamente, la carica  $Q$  genera un campo elettrico

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

- ... e un campo magnetico

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

- Nel caso di una carica in quiete, si ottiene, per il campo elettrico la formula di Coulomb, mentre il campo magnetico è nullo

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

- Infatti, le equazioni di Maxwell possono essere scritte in funzione dei potenziali invece che in funzione dei campi

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

- Infatti, le equazioni di Maxwell possono essere scritte in funzione dei potenziali invece che in funzione dei campi
- Le relazioni tra potenziali e campi sono:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

- Infatti, le equazioni di Maxwell possono essere scritte in funzione dei potenziali invece che in funzione dei campi
- Le relazioni tra potenziali e campi sono:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

- La formula del campo elettrico generato da una carica puntiforme si riduce a quella di Coulomb per  $v_Q = 0$

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

- Infatti, le equazioni di Maxwell possono essere scritte in funzione dei potenziali invece che in funzione dei campi
- Le relazioni tra potenziali e campi sono:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

- La formula del campo elettrico generato da una carica puntiforme si riduce a quella di Coulomb per  $v_Q = 0$
- Quella del campo magnetico può essere usata, per esempio, per calcolare il campo magnetico generato da un filo percorso da corrente. . .

# Campo EM di una carica puntiforme

- L'eventuale uso delle formule

$$\vec{E} \approx \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_{21}^3} \left( \vec{r}_{21} - r_{21} \frac{\vec{v}_Q}{c} \right)$$

$$\vec{B} \approx \frac{\mu_0}{4\pi} Q \frac{\vec{v}_Q \times \vec{r}_{21}}{r_{21}^3}$$

deve essere ricondotto al metodo ipotetico - deduttivo. In questo quadro e al momento opportuno, si dovrebbe richiamare come sia necessario introdurre - oltre al potenziale scalare  $\varphi$  anche un potenziale vettore  $\vec{A}$ .

- Infatti, le equazioni di Maxwell possono essere scritte in funzione dei potenziali invece che in funzione dei campi
- Le relazioni tra potenziali e campi sono:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

- La formula del campo elettrico generato da una carica puntiforme si riduce a quella di Coulomb per  $v_Q = 0$
- Quella del campo magnetico può essere usata, per esempio, per calcolare il campo magnetico generato da un filo percorso da corrente. . .
- . . . e insieme alla componente magnetica della forza di Lorentz per calcolare le forze tra due fili paralleli percorsi da corrente

## A proposito del concetto di campo

- “Che cosa intendiamo qui per “campo reale”? : un campo reale è una funzione matematica che usiamo per evitare l’idea di azione a distanza. Se abbiamo una particella carica nel punto P, su di essa agiscono altre cariche poste a una certa distanza da P. Un modo per descrivere questa interazione consiste nell’affermare che le altre cariche creano qualche “condizione” – qualunque cosa essa sia – nei dintorni di P. Se noi conosciamo questa “condizione” – che descriviamo dando il campo elettrico e il campo magnetico, allora possiamo determinare completamente il comportamento della particella – senza dover fare più alcun riferimento a come quelle “condizioni” sono entrate in gioco . . . Un “campo reale” è allora un insieme di numeri tali che ciò che accade in un punto dipende solo da questi numeri in quel punto. Non abbiamo più bisogno di sapere cosa accade in altri posti [Feynman, *Lectures*, vol. II, 15 - 7]”

# A proposito del concetto di campo

- “Che cosa intendiamo qui per “campo reale”? : un campo reale è una funzione matematica che usiamo per evitare l’idea di azione a distanza. Se abbiamo una particella carica nel punto P, su di essa agiscono altre cariche poste a una certa distanza da P. Un modo per descrivere questa interazione consiste nell’affermare che le altre cariche creano qualche “condizione” – qualunque cosa essa sia – nei dintorni di P. Se noi conosciamo questa “condizione” – che descriviamo dando il campo elettrico e il campo magnetico, allora possiamo determinare completamente il comportamento della particella – senza dover fare più alcun riferimento a come quelle “condizioni” sono entrate in gioco . . . Un “campo reale” è allora un insieme di numeri tali che ciò che accade in un punto dipende solo da questi numeri in quel punto. Non abbiamo più bisogno di sapere cosa accade in altri posti [Feynman, *Lectures*, vol. II, 15 - 7]”
- È opportuno osservare come l’aggettivo “reale” associato al sostantivo “campo” sia fuorviante e possa essere eliminato. Feynman usa questo aggettivo per sostenere che il campo del potenziale vettore è “reale” nella fisica quantica ma non nell’elettromagnetismo.

## A proposito del concetto di campo

- “Che cosa intendiamo qui per “campo reale”? : un campo reale è una funzione matematica che usiamo per evitare l’idea di azione a distanza. Se abbiamo una particella carica nel punto P, su di essa agiscono altre cariche poste a una certa distanza da P. Un modo per descrivere questa interazione consiste nell’affermare che le altre cariche creano qualche “condizione” – qualunque cosa essa sia – nei dintorni di P. Se noi conosciamo questa “condizione” – che descriviamo dando il campo elettrico e il campo magnetico, allora possiamo determinare completamente il comportamento della particella – senza dover fare più alcun riferimento a come quelle “condizioni” sono entrate in gioco . . . Un “campo reale” è allora un insieme di numeri tali che ciò che accade in un punto dipende solo da questi numeri in quel punto. Non abbiamo più bisogno di sapere cosa accade in altri posti [Feynman, *Lectures*, vol. II, 15 - 7]”
- È opportuno osservare come l’aggettivo “reale” associato al sostantivo “campo” sia fuorviante e possa essere eliminato. Feynman usa questo aggettivo per sostenere che il campo del potenziale vettore è “reale” nella fisica quantica ma non nell’elettromagnetismo.
- Ma, come abbiamo visto a proposito dell’induzione elettromagnetica, anche nell’elettromagnetismo il campo del potenziale vettore è “reale” nel senso di Feynman

# Elettromagnetismo e causalità

- Le equazioni dell'elettromagnetismo – **quando scritte in forma locale** – sono suscettibili di una interpretazione causale

# Elettromagnetismo e causalità

- Le equazioni dell'elettromagnetismo – **quando scritte in forma locale** – sono suscettibili di una interpretazione causale
- Le equazioni di Maxwell **scritte in forma differenziale** sono interpretate dicendo che le cariche producono (sono la causa dei) i campi

# Elettromagnetismo e causalità

- Le equazioni dell'elettromagnetismo – **quando scritte in forma locale** – sono suscettibili di una interpretazione causale
- Le equazioni di Maxwell **scritte in forma differenziale** sono interpretate dicendo che le cariche producono (sono la causa dei) i campi
- **Di conseguenza**, non è possibile affermare che l'equazione del rotore del campo elettrico

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

può essere interpretata dicendo che una variazione temporale del campo elettrico produce un campo magnetico

# Elettromagnetismo e causalità

- Le equazioni dell'elettromagnetismo – **quando scritte in forma locale** – sono suscettibili di una interpretazione causale
- Le equazioni di Maxwell **scritte in forma differenziale** sono interpretate dicendo che le cariche producono (sono la causa dei) i campi
- **Di conseguenza**, non è possibile affermare che l'equazione del rotore del campo elettrico

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

può essere interpretata dicendo che una variazione temporale del campo elettrico produce un campo magnetico

- **Perchè questa equazione esprime solo una relazione tra i due campi**

# Elettromagnetismo e causalità

- Le equazioni dell'elettromagnetismo – **quando scritte in forma locale** – sono suscettibili di una interpretazione causale
- Le equazioni di Maxwell **scritte in forma differenziale** sono interpretate dicendo che le cariche producono (sono la causa dei) i campi
- **Di conseguenza**, non è possibile affermare che l'equazione del rotore del campo elettrico

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

può essere interpretata dicendo che una variazione temporale del campo elettrico produce un campo magnetico

- **Perchè questa equazione esprime solo una relazione tra i due campi**
- Una considerazione analoga vale per l'equazione del rotore del campo magnetico

# Esperimento di Coulomb

- Di solito si legge nei manuali che l'esperimento di Coulomb ha dimostrato che vale la legge:

$$\vec{F} \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

# Esperimento di Coulomb

- Di solito si legge nei manuali che l'esperimento di Coulomb ha dimostrato che vale la legge:

$$\vec{F} \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Coulomb misurò – con una bilancia di torsione appositamente progettata e costruita – la dipendenza della forza tra due sferette di sanbucò cariche dalla loro distanza. Non fece invece alcuna misura sulla dipendenza della forza dalla carica delle sferette

# Esperimento di Coulomb

- Di solito si legge nei manuali che l'esperimento di Coulomb ha dimostrato che vale la legge:

$$\vec{F} \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Coulomb misurò – con una bilancia di torsione appositamente progettata e costruita – la dipendenza della forza tra due sferette di sanbucò cariche dalla loro distanza. Non fece invece alcuna misura sulla dipendenza della forza dalla carica delle sferette
- Coulomb ha condotto a termine tre misure la cui replicabilità è stata successivamente valutata in modo controverso e, comunque, **tale da non poter fondare su di esse la cosiddetta legge di Coulomb**

# Esperimento di Coulomb

- Di solito si legge nei manuali che l'esperimento di Coulomb ha dimostrato che vale la legge:

$$\vec{F} \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Coulomb misurò – con una bilancia di torsione appositamente progettata e costruita – la dipendenza della forza tra due sferette di sanbucò cariche dalla loro distanza. Non fece invece alcuna misura sulla dipendenza della forza dalla carica delle sferette
- Coulomb ha condotto a termine tre misure la cui replicabilità è stata successivamente valutata in modo controverso e, comunque, **tale da non poter fondare su di esse la cosiddetta legge di Coulomb**
- Non a caso, i successivi esperimenti sulla **adeguatezza** della legge dell'inverso del quadrato della distanza si sono concentrati sul metodo di Cavendish (1773)

# Esperimento di Coulomb

- Di solito si legge nei manuali che l'esperimento di Coulomb ha dimostrato che vale la legge:

$$\vec{F} \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Coulomb misurò – con una bilancia di torsione appositamente progettata e costruita – la dipendenza della forza tra due sferette di sanbucò cariche dalla loro distanza. Non fece invece alcuna misura sulla dipendenza della forza dalla carica delle sferette
- Coulomb ha condotto a termine tre misure la cui replicabilità è stata successivamente valutata in modo controverso e, comunque, **tale da non poter fondare su di esse la cosiddetta legge di Coulomb**
- Non a caso, i successivi esperimenti sulla **adeguatezza** della legge dell'inverso del quadrato della distanza si sono concentrati sul metodo di Cavendish (1773)
- Nel caso della formulazione della legge di Coulomb, la **“carica di teoria”** ha di fatto plasmato la legge, siccome i dati sperimentali erano incompleti e la loro accuratezza largamente insufficiente

## Il metodo di Cavendish (1773)

La descrizione teorica dell'esperimento si basa sulle seguenti assunzioni:

- (a) I punti di un conduttore in equilibrio elettrico si trovano allo stesso potenziale
- (b) Vale la legge dell'inverso del quadrato della distanza

Da (a) segue: il campo elettrico all'interno di un conduttore in equilibrio elettrico è nullo (c).

Da (b) segue il teorema di Gauss (d).

Infine, da (c) e (d) segue che la sfera interna è priva di carica. Il risultato dell'esperimento indica che la sfera interna è priva di carica, *nei limiti di sensibilità dello strumento*.

- L'esperimento di Cavendish fu replicato – con alcune variazioni – da Maxwell

## Il metodo di Cavendish (1773)

La descrizione teorica dell'esperimento si basa sulle seguenti assunzioni:

- (a) I punti di un conduttore in equilibrio elettrico si trovano allo stesso potenziale
- (b) Vale la legge dell'inverso del quadrato della distanza

Da (a) segue: il campo elettrico all'interno di un conduttore in equilibrio elettrico è nullo (c).

Da (b) segue il teorema di Gauss (d).

Infine, da (c) e (d) segue che la sfera interna è priva di carica. Il risultato dell'esperimento indica che la sfera interna è priva di carica, *nei limiti di sensibilità dello strumento*.

- L'esperimento di Cavendish fu replicato – con alcune variazioni – da Maxwell
- Sia Cavendish che Maxwell si pongono il problema di valutare il coefficiente  $q$  della formula

$$F \approx \frac{1}{r^{(2 \pm q)}}$$

Cavendish ottiene  $q \leq 2 \times 10^{-2}$ ; Maxwell ottiene invece  $q \leq 1/21600 \approx 4.6 \times 10^{-5}$

## Il metodo di Cavendish (1773)

La descrizione teorica dell'esperimento si basa sulle seguenti assunzioni:

- (a) I punti di un conduttore in equilibrio elettrico si trovano allo stesso potenziale
- (b) Vale la legge dell'inverso del quadrato della distanza

Da (a) segue: il campo elettrico all'interno di un conduttore in equilibrio elettrico è nullo (c).  
Da (b) segue il teorema di Gauss (d).

Infine, da (c) e (d) segue che la sfera interna è priva di carica. Il risultato dell'esperimento indica che la sfera interna è priva di carica, *nei limiti di sensibilità dello strumento*.

- L'esperimento di Cavendish fu replicato – con alcune variazioni – da Maxwell
- Sia Cavendish che Maxwell si pongono il problema di valutare il coefficiente  $q$  della formula

$$F \approx \frac{1}{r^{(2\pm q)}}$$

Cavendish ottiene  $q \leq 2 \times 10^{-2}$ ; Maxwell ottiene invece  $q \leq 1/21600 \approx 4.6 \times 10^{-5}$

- In tempi recenti, il valore di  $q$  è stato ridotto a circa  $10^{-17}$

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento
- Per quanto riguarda la fisica il contributo maggiore fu dovuto all'elettromagnetismo

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento
- Per quanto riguarda la fisica il contributo maggiore fu dovuto all'elettromagnetismo
- La produzione dell'energia elettrica – con la sola eccezione della trasformazione dell'energia luminosa in energia elettrica – utilizza il fenomeno dell'induzione elettromagnetica

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento
- Per quanto riguarda la fisica il contributo maggiore fu dovuto all'elettromagnetismo
- La produzione dell'energia elettrica – con la sola eccezione della trasformazione dell'energia luminosa in energia elettrica – utilizza il fenomeno dell'induzione elettromagnetica
- Le telecomunicazioni di ogni tipo si basano sull'uso di onde elettromagnetiche

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento
- Per quanto riguarda la fisica il contributo maggiore fu dovuto all'elettromagnetismo
- La produzione dell'energia elettrica – con la sola eccezione della trasformazione dell'energia luminosa in energia elettrica – utilizza il fenomeno dell'induzione elettromagnetica
- Le telecomunicazioni di ogni tipo si basano sull'uso di onde elettromagnetiche
- La fisica dello stato solido – che ha visto un impetuoso sviluppo dopo la seconda guerra mondiale – ha incrementato il ritmo di crescita delle telecomunicazioni

- L'intreccio tra Scienza e applicazioni tecniche si è consolidato nel corso dell'Ottocento
- Per quanto riguarda la fisica il contributo maggiore fu dovuto all'elettromagnetismo
- La produzione dell'energia elettrica – con la sola eccezione della trasformazione dell'energia luminosa in energia elettrica – utilizza il fenomeno dell'induzione elettromagnetica
- Le telecomunicazioni di ogni tipo si basano sull'uso di onde elettromagnetiche
- La fisica dello stato solido – che ha visto un impetuoso sviluppo dopo la seconda guerra mondiale – ha incrementato il ritmo di crescita delle telecomunicazioni
- Nel corso dell'Ottocento, tre fisici hanno impresso il loro sigillo su questo processo: Faraday, Maxwell ed Hertz

- Pensiamo che questo approccio all'elettromagnetismo possa essere sperimentato nelle SSS.

- Pensiamo che questo approccio all'elettromagnetismo possa essere sperimentato nelle SSS.
- Sarebbe assai interessante se qualcuno del Gruppo FSE si rendesse disponibile per una sperimentazione di questo tipo.

- Pensiamo che questo approccio all'elettromagnetismo possa essere sperimentato nelle SSS.
- Sarebbe assai interessante se qualcuno del Gruppo FSE si rendesse disponibile per una sperimentazione di questo tipo.
- Siamo disponibili a dare tutto il supporto possibile: nella progettazione della sperimentazione, nella preparazione di materiale didattico e assicurando una costante interazione durante la sperimentazione.

- Pensiamo che questo approccio all'elettromagnetismo possa essere sperimentato nelle SSS.
- Sarebbe assai interessante se qualcuno del Gruppo FSE si rendesse disponibile per una sperimentazione di questo tipo.
- Siamo disponibili a dare tutto il supporto possibile: nella progettazione della sperimentazione, nella preparazione di materiale didattico e assicurando una costante interazione durante la sperimentazione.
- Chi si fa avanti?

# Le interazioni fondamentali. I

- Interazione gravitazionale, tra masse puntiformi o sferiche e omogenee.

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Questa interazione è del tipo “a distanza”: essa suppone che l’interazione gravitazionale si propaghi con velocità infinita, cioè istantaneamente (Newton)

# Le interazioni fondamentali. I

- Interazione gravitazionale, tra masse puntiformi o sferiche e omogenee.

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Questa interazione è del tipo “a distanza”: essa suppone che l’interazione gravitazionale si propaghi con velocità infinita, cioè istantaneamente (Newton)

- Invece di descrivere l’interazione gravitazionale in termini della forza esercitata da una massa puntiforme (o sferica e omogenea)  $M$  su di un’altra massa puntiforme  $m$ , possiamo procedere in questo modo. La massa  $M$  produce un **campo gravitazionale** dato da:

$$\vec{g} = -GM \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Allora, una piccola massa puntiforme di prova posta in questo campo è sottoposta ad una forza data da:

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

# Le interazioni fondamentali. I

- Interazione gravitazionale, tra masse puntiformi o sferiche e omogenee.

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Questa interazione è del tipo “a distanza”: essa suppone che l’interazione gravitazionale si propaghi con velocità infinita, cioè istantaneamente (Newton)

- Invece di descrivere l’interazione gravitazionale in termini della forza esercitata da una massa puntiforme (o sferica e omogenea)  $M$  su di un’altra massa puntiforme  $m$ , possiamo procedere in questo modo. La massa  $M$  produce un **campo gravitazionale** dato da:

$$\vec{g} = -GM \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Allora, una piccola massa puntiforme di prova posta in questo campo è sottoposta ad una forza data da:

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

- Interazione elettromagnetica

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B})$$

dove  $q$  è la carica puntiforme posta nel **campo elettromagnetico**  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{v}_q$  la sua velocità.

# Le interazioni fondamentali. I

- Interazione gravitazionale, tra masse puntiformi o sferiche e omogenee.

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Questa interazione è del tipo “a distanza”: essa suppone che l’interazione gravitazionale si propaghi con velocità infinita, cioè istantaneamente (Newton)

- Invece di descrivere l’interazione gravitazionale in termini della forza esercitata da una massa puntiforme (o sferica e omogenea)  $M$  su di un’altra massa puntiforme  $m$ , possiamo procedere in questo modo. La massa  $M$  produce un **campo gravitazionale** dato da:

$$\vec{g} = -GM \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Allora, una piccola massa puntiforme di prova posta in questo campo è sottoposta ad una forza data da:

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

- Interazione elettromagnetica

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B})$$

dove  $q$  è la carica puntiforme posta nel **campo elettromagnetico**  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{v}_q$  la sua velocità.

- Interazione *forte*. L’interazione forte è di tipo attrattivo e opera tra tutti i componenti del nucleo. Essa è la stessa tra protone - protone, protone - neutrone e neutrone - neutrone.

# Le interazioni fondamentali. I

- Interazione gravitazionale, tra masse puntiformi o sferiche e omogenee.

$$\vec{F} = G \frac{Mm}{r^2}$$

Questa interazione è del tipo “a distanza”: essa suppone che l’interazione gravitazionale si propaghi con velocità infinita, cioè istantaneamente (Newton)

- Invece di descrivere l’interazione gravitazionale in termini della forza esercitata da una massa puntiforme (o sferica e omogenea)  $M$  su di un’altra massa puntiforme  $m$ , possiamo procedere in questo modo. La massa  $M$  produce un **campo gravitazionale** dato da:

$$\vec{g} = -GM \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Allora, una piccola massa puntiforme di prova posta in questo campo è sottoposta ad una forza data da:

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

- Interazione elettromagnetica

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v}_q \times \vec{B})$$

dove  $q$  è la carica puntiforme posta nel **campo elettromagnetico**  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{v}_q$  la sua velocità.

- Interazione *forte*. L’interazione forte è di tipo attrattivo e opera tra tutti i componenti del nucleo. Essa è la stessa tra protone - protone, protone - neutrone e neutrone - neutrone.
- Interazione *debole*. Ha un raggio d’azione ancora più ridotto di quello dell’interazione forte. È responsabile del decadimento  $\beta$  e regola alcune proprietà dei quark.

## Le interazioni fondamentali. II

Interazione	Intensità relativa	Intervallo di azione
Gravitazionale	$10^{-38}$	$\infty$
Debole	$10^{-13}$	$< 10^{-18}$ m
Elettromagnetica	$< 10^{-2}$	$\infty$
Forte	1	$< 10^{-15}$ m

Tabella: intensità relativa e intervallo di azione delle quattro interazioni fondamentali.