

Insegnare la fisica moderna

Introduzione

Relatività - prima puntata

Che cosa è la “fisica moderna”?

Per fisica moderna dovrebbe intendersi tutta la fisica dalla fine del 19-mo secolo (se si preferisce, dalla scoperta dell'elettrone) a oggi.

Non solo relatività e meccanica quantistica, dunque. Che in fin dei conti hanno ormai un secolo di vita...

Un ... breve elenco

Ecco un breve (e incompleto) elenco di cose che fanno parte della fisica moderna:

- la fisica nucleare
- le particelle e le interazioni fondamentali
- la meccanica statistica (classica e quantistica)
- la fisica della materia condensata e in particolare
 - la fisica dei solidi e relative (immense) applicazioni
- la fisica dei plasmi
- l'astrofisica: struttura ed evoluzione delle stelle, delle galassie, ecc.
- la cosmologia
- l'ottica quantistica: laser ecc.
- l'elettronica
- la “nuova meccanica” (sistemi dinamici, caos deterministico).

Ma teniamo i piedi per terra

Bisogna fare i conti prima di tutto col tempo, ma anche con la maturità dei ragazzi ... e quindi ci si restringe.

Tuttavia c'è modo e modo di restringersi ... ma non anticipiamo.

Questo breve corso ha uno scopo pratico: rispondere alla richiesta posta dalla necessità di non trascurare nell'ultimo anno (?) del Liceo Sc. argomenti di “fisica moderna”, anche in vista dell'introduzione di una prova scritta di Fisica.

Dovremo quindi basarci sulle Indicazioni Nazionali (IN, [1]) e sul recente “Syllabus” (Sy, [2]), che fissa gli argomenti che potranno essere oggetto della prova.

Non che le prime e il secondo siano esenti da critiche, ma costituiscono *purtroppo* un vincolo ineludibile. Perciò questo corso cercherà (almeno come linea generale) di attenersi alle IN e al Sy.

Per una discussione più approfondita su che cosa significa fisica moderna, e su alcuni difetti tipici di una tradizione didattica come la si ritrova nelle IN e in molti libri di testo, rimando a [3].

Queste lezioni — così come le vedete — si trovano in [4].

Calendario e programma

20/10: Introduzione.

Relatività come fisica dello spazio-tempo. Invarianti.

30/10: La geometria dello spazio-tempo. Gli esperimenti fondamentali.

6/11: Dinamica relativistica. Massa ed energia.

27/11: Fisica quantistica: come insegnarla. Partire dai fatti.

I problemi aperti a fine '800.

4/12: Nuovi esperimenti (Rutherford, Franck-Hertz) e primi modelli.

Il concetto di fotone.

11/12: Altri esperimenti (Compton, Davisson-Germer, Stern-Gerlach);
modelli, interpretazione.

Il cosiddetto “dualismo” e il “principio d'indeterminazione”.

Come impostare l'insegnamento della relatività

1. Lasciamo da parte il cosiddetto “approccio storico” (cosiddetto, perché di regola ha poco a che fare con la storia reale).

La storia della relatività, come di qualsiasi altra parte della fisica, è molto complessa, e non si riduce alla storiella dell'esperimento di Michelson-Morley.

Ci sono vari problemi, antefatti, sviluppi anche gradualmente ... pur se certamente il famoso articolo di Einstein del 1905 è stato centrale.

È bene ricordare almeno due cose:

a) L'articolo citato ha un titolo “oscuro”: *Per l'elettrodinamica dei corpi in moto*.

b) La denominazione “teoria della relatività” non è di Einstein: è stata data successivamente da Planck (e non è molto felice).

La relatività non deve essere materia del solo ultimo anno

Si può (si deve) cominciare ad accostarsi all'argomento *fin dall'inizio dell'insegnamento della meccanica*.

2. Occorre sviluppare adeguatamente il concetto di *sistema di riferimento* ([5] lez03.pdf).

Prima di tutto: sistema di riferimento (abbrevierò con “rif.”) non è la stessa cosa che *sistema di coordinate* (SC).

Questo è un concetto *matematico*, mentre il rif. è *fisica*.

Un SC è utilissimo in molti casi, ma *non sempre*; tante volte se ne può anche fare a meno.

Un rif. invece *non può essere dimenticato*: deve essere sempre individuato, e *bisogna sempre tenerlo presente*, pena gravi errori.

Nota: preferisco dire “riferimento” invece di “sistema di riferimento”, perché la parola “sistema” in fisica ha troppi significati...

Che cos'è un riferimento?

Un rif. è un oggetto *concreto*, che nel modo più semplice può essere identificato con un *laboratorio*.

È uno spazio dotato di un'intelaiatura *rigida* (magari le pareti) e di tutti gli *strumenti* occorrenti per le misure da eseguire su un dato *esperimento*.

Dare molti esempi:

- quest'aula
- un'automobile in autostrada
- un'automobile su una strada di montagna
- un ascensore
- un satellite in orbita
- una stazione spaziale sulla Luna
- una giostra
- un “otto volante”.

Lo scopo degli esempi è di mostrare che un rif. *può essere in moto qualsiasi*.

Tuttavia i rif. non sono tutti *ugualmente buoni*: quelli buoni si chiamano “inerziali” (RI).

La definizione di RI non è semplice. Come prima approssimazione si può pensare a un rif. *solidale alla Terra*.

Poi, raffinando, si vede che non è proprio vero...

Almeno fin qui, non vedo difficoltà a parlarne in terza; anzi, lo riterrei necessario.

La definizione astratta:

un rif. è inerziale quando in esso vale la legge d'inerzia
(prima legge di Newton)

è tutt'altro che banale, se la si discute a fondo.

Il problema è: come si fa a sapere che un corpo non è soggetto a forze?

Non insisto, perché non si tratta di questione propria della relatività, ma già della meccanica newtoniana.

Un commento mi sembra però opportuno.

Questo è solo un esempio (potrei trovarne molti altri) in cui alcuni punti delicati o critici avrebbero bisogno di un approfondimento, rispetto a ciò che è possibile nelle prime classi.

(Penso alla 3^a: la dinamica in 2^a mi sembra fuori questione, checché ne dicano le IN.)

Ricordo che in una versione iniziale delle IN si ventilava la possibilità di dedicare del tempo in quinta appunto a questi approfondimenti.

Poi purtroppo l'idea è caduta, mentre a me sembrerebbe interessante, anche per altri motivi.

Leggi di trasformazione

3. Accade spesso di trovarsi a descrivere *uno stesso* fenomeno, *uno stesso* esperimento, da due (o più) rif. diversi.

Nasce allora il problema:

*come si trasformano le grandezze fisiche di quel fenomeno,
di quell'esperimento, passando da un rif. a un altro?*

Anche nel caso più semplice:

come si trasformano le grandezze fisiche passando da un RI a un altro?

(ci occuperemo solo di questo caso.)

È evidente che *alcune grandezze cambiano* (per es. la velocità).

Altre non cambiano (per es. l'accelerazione); ma capire questo è meno semplice.

Tuttavia le grandezze che non cambiano sono particolarmente importanti e hanno un nome speciale: si chiamano *invarianti*.

Attenzione a non confondere “invariante” con “costante”.

Invariante ha il significato che ho detto.

Costante ha diverse accezioni, ma l'uso più comune è che si dice costante una grandezza che *non varia nel tempo*.

Per es. quantità di moto o energia (totale) di un sistema isolato.

Fisica newtoniana e fisica relativistica

4. La differenza sta prima di tutto in ciò che viene considerato *invariante*.

Da un punto di vista assiomatico, *si contrappongono due scelte*:

- fisica newtoniana: è invariante il *tempo* (si usa dire “assoluto”, ma è la stessa cosa)
- fisica relativistica: è invariante la *velocità della luce* nel vuoto.

Le due scelte sono *incompatibili*: dimostriamolo.

L'orologio a luce

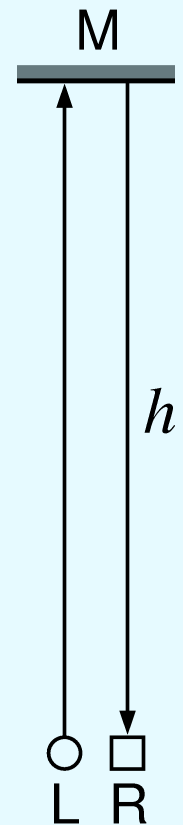
Questo dispositivo ideale serve a vari scopi.

Si tratta di una sorgente di luce L che emette un breve impulso luminoso.

Questo viene riflesso da uno specchio M, e torna verso la sorgente, dove viene rivelato dal rivelatore R.

Si misura l'intervallo di tempo, che chiamerò $2\Delta t$, tra emissione e ricezione dell'impulso.

Se h è la distanza fra L(R) e M, si ha $c\Delta t = h$.



Cambiamo riferimento

Supponiamo che l'orologio a luce sia montato su un treno T, che percorre a velocità costante v un binario rettilineo.

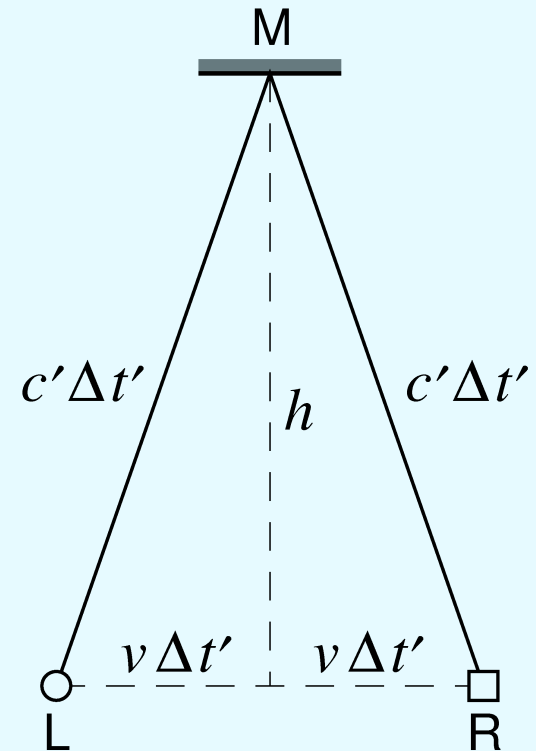
Possiamo studiare l'esperimento da un rif. solidale al terreno, che diremo il rif. S della stazione.

In questo rif. la situazione si presenta come mostra la figura accanto.

Ho indicato la velocità della luce con c' e l'intervallo di tempo con $\Delta t'$, per non pregiudicare la scelta su quale dei due sia invariante.

La figura mostra che

$$(c'\Delta t')^2 = (v\Delta t')^2 + h^2$$
$$(c'^2 - v^2)(\Delta t')^2 = c^2\Delta t^2.$$



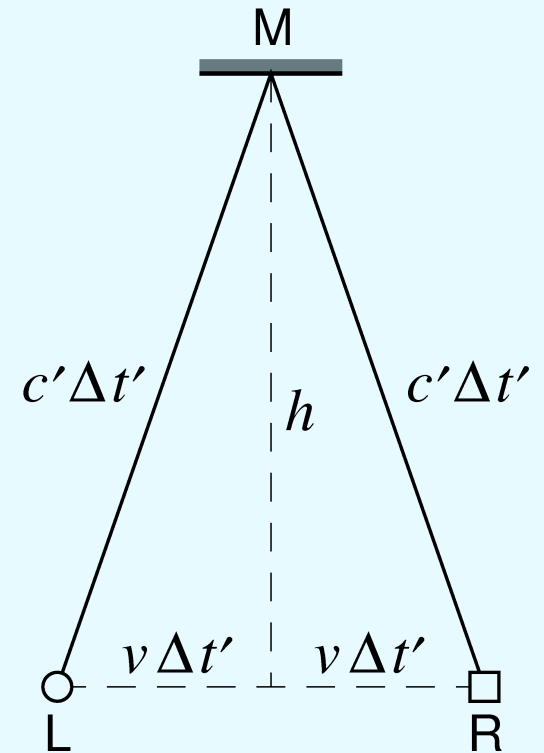
La figura mostra che

$$(c'^2 - v^2) (\Delta t')^2 = c^2 \Delta t^2$$

ed è chiaro che

se $\Delta t' = \Delta t$, allora $c' > c$

se $c' = c$, allora $\Delta t' > \Delta t$.



Una domanda legittima

Ci si può chiedere: perché abbiamo fatto muovere l'orologio in direzione perpendicolare alla propagazione della luce?

Per rispondere si deve svelare un trucco: nel ragionamento abbiamo dato per scontato che la distanza verticale fra L(R) e M, che abbiamo chiamato h in entrambe le figure, sia *invariante*.

In effetti è così, e lo si può dimostrare con un semplice ragionamento, che usa solo il PR. Ma il tempo non mi permette di dire di più.

Aggiungo solo che invece se il moto di T rispetto a S fosse nella stessa direzione in cui si propaga la luce, la distanza *non sarebbe invariante* (è la famosa “contrazione di Lorentz”).

E si può usare ancora l'orologio a luce per dimostrarlo.

Il principio di relatività

5. È il primo ([5] lez04.pdf) dei due famosi “postulati di Einstein” (del secondo parleremo più avanti).

Ecco come lo enuncia Einstein:

[...] alla supposizione che il concetto di quiete assoluta non solo in meccanica, ma anche in elettrodinamica non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza, e che inoltre per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni meccaniche debbano valere anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche [...]. Assumeremo questa congettura (il contenuto della quale nel seguito sarà chiamato “principio di relatività”) come postulato [...]

Ci sono da notare due cose:

- 1) E. parla di SC, oggi preferiamo dire “rif.”
- 2) L'enunciato di E. ricalca esattamente quello di Galileo, a parte la forma più astratta: E. parla di “leggi”, G. parla di “esperimenti”.

La forma galileiana è più adatta a una classe iniziale.

In questa forma, non vedo ostacoli a enunciarlo fin dall'inizio della meccanica.

Raccomando vivamente la lettura del famoso brano dei *Massimi Sistemi*.

I ragazzi *possono anche sperimentare*: è stato fatto.

C'è chi dice che tra E. e G. c'è una differenza, perché G. parla solo di meccanica, mentre E. dice chiaramente che il PR ha validità universale.

A mio parere è un argomento storicamente infondato.

Il principio di equivalenza

6. La storia del PE ([5] lez05.pdf, lez06.pdf) va spiegata meglio, perché coincide con la nascita della Relatività Generale.

E. non è soddisfatto del ruolo privilegiato dei RI, e vorrebbe trovare una formulazione delle leggi fisiche che valga in *qualunque* rif., anche non inerziale. Da qui l'idea di una *Teoria generale della relatività*, brevemente RG.

Si sofferma sul fatto (ben noto) che nei rif. non inerziali per salvare la seconda legge di Newton occorre introdurre *forze apparenti*, che sono sempre *proporzionali alla massa* del corpo su cui agiscono.

L'idea cruciale di E. sta nell'associare questo fatto con l'altro, ugualmente noto (dai tempi di Newton): anche *la gravità è proporzionale alla massa* del corpo su cui agisce.

Del resto, proprio in ciò consiste la scoperta di G.: l'*universalità* del moto in campo gravitazionale.

E. fa poi un altro passo: in un rif. in *caduta libera* in campo gravitazionale la forza apparente *cancella* la forza di gravità: i corpi sono *senza peso*.

In realtà anche questo era noto a N., che l'aveva usato (all'inverso) nei *Principia* appunto per dimostrare che la gravità è proporzionale alla massa del corpo su cui agisce: N. osserva che i satelliti di Giove si muovono attorno al pianeta *come se l'attrazione del Sole non ci fosse*.

Ma vale anche il *viceversa*: agli effetti meccanici la forza apparente in un rif. accelerato è *equivalente* a un campo gravitazionale agente in un rif. inerziale.

È questo il *principio di equivalenza* (PE) (debole).

Dunque fin qui nessuna scoperta, ma E. va oltre:

a) afferma che l'*equivalenza* tra forza apparente e forza di gravità non *deve valere* solo per la meccanica, ma *per tutta la fisica* (lo stesso passo che aveva fatto col PR): questo è il PE *forte*

b) comprende che se questa proprietà della gravità è generale, deve valere anche in ambito relativistico, e ciò richiede quindi la costruzione di una *teoria relativistica della gravitazione*

c) arriva a un'intuizione: se l'azione della gravità è indipendente dalla massa e dalla natura dei corpi, sembra ragionevole vederla non come una *proprietà* dei corpi stessi, ma *dello spazio* in cui si muovono: anzi *dello spazio-tempo*

d) con un ragionamento in realtà scorretto, ma di grande valore euristico, si convince che questa proprietà dello spazio-tempo dovrà avere a che fare con la sua struttura geometrica: *in presenza di gravità* lo spazio-tempo deve essere *curvo*.

Da qui in poi, con un lavoro che dura anni, e che gli richiede d'imparare della matematica nuovissima (il cosiddetto *calcolo differenziale assoluto*) arriva a costruire la teoria completa, che è universalmente nota come RG.

Il primo grande successo della teoria (1915) è la *precessione del perielio* di Mercurio, nota da almeno 60 anni e ancora inspiegata.

Fa poi delle previsioni su fenomeni allora sconosciuti, che verranno verificati in seguito: alcuni abbastanza presto, altri solo dopo decenni.

Mette infine al lavoro la RG per studiare la *struttura e l'evoluzione* dell'Universo, facendo nascere la *cosmologia scientifica*.

Osserviamo che l'iniziale *programma di ricerca* (generalizzare la relatività a rif. in moto qualsiasi) ha finito per essere dimenticato, cedendo il posto a quello che ho già indicato:

costruire una teoria relativistica della gravitazione.

Sembrerà strano, ma questo fatto non è ancora stato capito da tutti: si legge spesso che la RG *generalizza* la RR ai rif. *non inerziali*.

Quando invece la vera distinzione è un'altra:

- RR: spazio-tempo *piatto* (o almeno, curvatura *trascurabile*)
- RG: spazio-tempo curvo (quindi presenza di *materia* che produce la *curvatura*).

Si può insegnare la RG?

7. Esiste un fortissimo *pregiudizio* contrario, motivato dal modo obiettivamente complesso come la teoria è nata, e dal fatto che ancor oggi sono pochissimi i fisici che la conoscono a sufficienza.

D'altra parte si tratta di una teoria di *estrema importanza* nella fisica del 20-mo secolo: ha fornito la spiegazione di molti fenomeni, è *largamente confermata*, ha trasformato la *cosmologia* da tema filosofico in *capitolo della fisica*.

Per non parlare del fascino esercitato da alcuni argomenti di conoscenza comune (come parole):

- *big bang ed espansione dell'universo*
- *onde gravitazionali*
- *buchi neri e stelle di neutroni*.

I risultati della RG hanno oggi perfino *applicazioni tecniche* (GPS).

C'è poi una motivazione di altro genere: da un punto di vista moderno è corretto dire che **la relatività è una**: la distinzione RR/RG ha un senso nell'ambito della teoria, ma non giustifica di considerarle teorie separate.

Di fatto, non solo è possibile dare i primi elementi della RG, ma è giusto farne una *presentazione unificata*.

Così ad es. il PE può essere trattato abbastanza presto, almeno fino al punto di dare significato all'espressione:

in una navicella spaziale in orbita i corpi sono senza peso.

Avendo tempo si può fare molto di più, con *mezzi matematici elementari e con pieno rigore scientifico*.

Qui non posso parlarne: rimando a [5], dove è mostrato come questo si possa fare.

Torniamo alle due alternative...

8. Dicevamo:

Da un punto di vista assiomatico, *si contrappongono due scelte*:

- fisica newtoniana: è invariante il *tempo* (si usa dire “assoluto”, ma è la stessa cosa)
- fisica relativistica: è invariante la *velocità della luce* nel vuoto.

Il solo criterio è l'esperimento.

Ai tempi di N., e per molto tempo dopo, tutto parlava in favore dell'invarianza di t .

Allora perché E. fa la scelta opposta? C'erano esperimenti?

A questo punto si cita sempre l'esperimento di M-M.

Ma E. *non lo nomina*, anzi ha detto esplicitamente (in seguito) che non l'aveva considerato.

E. si concentra piuttosto sull'*induzione e.m.*: moto di un magnete rispetto a una spira.

La spiegazione usuale è diversa a seconda che a muoversi sia il *magnete* o la *spira*, e questo lo disturba; non accetta la *mancaanza di simmetria*.

Ecco che cosa scrive:

Esempi di tipo analogo, come pure i tentativi andati a vuoto di constatare un moto della terra relativamente al “mezzo luminoso” portano alla supposizione che il concetto di quiete assoluta [...] non corrisponda ad alcuna proprietà dell'esperienza [...]

Però i “tentativi” sembrano proprio riferirsi all'esperimento di M-M: il problema storico non è mai stato chiarito.

I famosi “due postulati” della RR

9. Il primo è il PR, e ne abbiamo già parlato.

Il secondo E. lo enuncia così:

[...] introdurremo inoltre il postulato — con questo solo apparentemente incompatibile — che la luce nello spazio vuoto si propaghi sempre con una velocità determinata V , indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti.

Viene sempre indicato come “postulato dell'invarianza della velocità della luce”, ma vale la pena di rifletterci un po'.

Se il PR già enuncia l'invarianza di tutte le leggi fisiche, e quindi in particolare delle eq. di Maxwell, che bisogno c'è di questo secondo postulato?

Dalle eq. di Maxwell segue l'esistenza delle onde e.m. e anche il valore della loro velocità nel vuoto. Quindi?

Forse la risposta sta nella clausola finale:

indipendente dallo stato di moto dei corpi emittenti.

Anche questa sembrerebbe inutile, date le eq. di Maxwell.

Siamo quindi costretti ad ammettere che a quella data (1905) E. non si sentisse di dare per scontato l'assenso dei fisici sulla validità delle eq. di M.

Non dimentichiamo che per risolvere il problema posto dall'esperimento di M-M erano state pensate delle “teorie balistiche”, secondo cui la velocità delle onde *dipenderebbe dalla velocità* delle cariche che le emettono.

Le teorie balistiche decadde quando arrivarono prove sperimentali (luce dalle *stelle doppie*: de Sitter, 1913) che sembravano confutarle.

Tuttavia la storia ancora una volta è complessa, perché la confutazione di de Sitter fu a sua volta invalidata dalla scoperta del *teorema di estinzione* (Ewald, Oseen: 1912-1915).

Per essere in seguito ripresa usando radiazione X al posto della luce visibile.

Conclusione: *un secolo dopo*, quando non ci sono più dubbi sulle eq. di Maxwell, *il secondo postulato di E. è inutile.*

Il primo postulato (PR) è *sufficiente da solo.*

Conclusione e riassunto didattico

10. Vediamo in breve l'approccio che propongo per la parte iniziale della relatività.

- Iniziare i primi passi *fin dalla terza*.
- La relatività è *una*: presentare insieme, fin dall'inizio, le basi della RR e della RG (PR e PE).
- Dedicare adeguato spazio ai *riferimenti*.
- Chiarire (con esempi) la *trasformazione* di grandezze fisiche da un rif. a un altro. *Non sto parlando di formule*, tipo trasformazioni di Galileo o di Lorentz!
- Chiarire il concetto d'invariante. *Tempo* invariante (assoluto) nella fisica newtoniana, *velocità della luce* invariante nella fisica einsteiniana.
- Sono due scelte incompatibili: l'orologio a luce.
- Rif. in caduta libera: *scomparsa della gravità*. L'interpretazione alla Newton e quella alla Einstein ([5] `lez06.pdf`).

Del tempo necessario ne parleremo alla fine.

Accenno solo che secondo Sy la relatività in 5^a dovrebbe disporre di 20 ore teoriche.

Collegamenti (links)

[1] Indicazioni Nazionali:

http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Liceo_Scientifico.pdf

[2] Syllabus:

<http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Syllabus.pdf>

[3] Seminario al Congresso AIF 2008:

<http://www.sagredo.eu/articoli/fismod.pdf>

[4] Queste lezioni:

<http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Pisa-2014-fismod-n.pdf>

(n sta per il n. d'ordine della lezione).

Questa è una collocazione temporanea.

[5] Relatività:

<http://www.sagredo.eu/Q16>

(esiste anche la versione stampata).