

Le verifiche sperimentali della relatività speciale

Giuseppe Giuliani

AIF, XX Scuola di Storia della Fisica

23 febbraio 2022

Avvertenza: il volume **Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia, epistemologia** di Giuseppe Giuliani, è citato nel testo come **ERQ**

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:

Introduzione

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:
- Omogeneità della **variabile** tempo

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:
- Omogeneità della **variabile** tempo
- Omogeneità e isotropia dello spazio

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:
- Omogeneità della **variabile** tempo
- Omogeneità e isotropia dello spazio
- Principio di invarianza (principio di relatività): ogni fenomeno fisico si svolge nello stesso modo in ogni SRI

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:
- Omogeneità della **variabile** tempo
- Omogeneità e isotropia dello spazio
- Principio di invarianza (principio di relatività): ogni fenomeno fisico si svolge nello stesso modo in ogni SRI
- La velocità della luce è la stessa in ogni SRI

- La relatività speciale nasce come una teoria assiomatica i cui postulati sono:
- Omogeneità della **variabile** tempo
- Omogeneità e isotropia dello spazio
- Principio di invarianza (principio di relatività): ogni fenomeno fisico si svolge nello stesso modo in ogni SRI
- La velocità della luce è la stessa in ogni SRI
- Quest'ultimo postulato può essere sostituito da “Sono valide le equazioni di Maxwell nel vuoto” \Rightarrow **ERQ** [pp. 30 - 35]

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé
- Gli orologi **mostrano i valori della variabile “tempo”** da esso generati

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé
- Gli orologi **mostrano i valori della variabile “tempo”** da esso generati
- Un orologio è costituito da tre elementi: una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé
- Gli orologi **mostrano i valori della variabile “tempo”** da esso generati
- Un orologio è costituito da tre elementi: una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore
- Definiamo **orologio ideale** un orologio il cui campione di frequenza non è influenzato da alcuna interazione fisica
- Tutte le teorie fisiche – ad eccezione della relatività generale – suppongono di avere a che fare con orologi ideali

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé
- Gli orologi **mostrano i valori della variabile “tempo”** da esso generati
- Un orologio è costituito da tre elementi: una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore
- Definiamo **orologio ideale** un orologio il cui campione di frequenza non è influenzato da alcuna interazione fisica
- Tutte le teorie fisiche – ad eccezione della relatività generale – suppongono di avere a che fare con orologi ideali

Che cosa è un orologio

- Di solito, si afferma che gli orologi “misurano il tempo”, così come – per esempio – un amperometro misura una corrente
- Gli orologi, in realtà, NON misurano alcuna grandezza fisica di qualcosa distinto da sé
- Gli orologi **mostrano i valori della variabile “tempo”** da esso generati
- Un orologio è costituito da tre elementi: una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore
- Definiamo **orologio ideale** un orologio il cui campione di frequenza non è influenzato da alcuna interazione fisica
- Tutte le teorie fisiche – ad eccezione della relatività generale – suppongono di avere a che fare con orologi ideali
- In questo quadro, è compito dello sperimentatore – guidato dalla teoria – quello di tenere conto di come i campioni di frequenza usati possano essere influenzati da interazioni fisiche \Rightarrow **ERQ** [pp. 27 - 30]

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:
- Orologi a pendolo che utilizzano la forza di gravità

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:
- Orologi a pendolo che utilizzano la forza di gravità
- Orologi a molla

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:
- Orologi a pendolo che utilizzano la forza di gravità
- Orologi a molla
- Orologi al quarzo (o basati su circuiti elettrici risonanti)

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:
- Orologi a pendolo che utilizzano la forza di gravità
- Orologi a molla
- Orologi al quarzo (o basati su circuiti elettrici risonanti)
- Orologi la cui frequenza campione è costituita da una radiazione elettromagnetica (classe EM)

Classi di orologi. I

- Gli orologi artificiali usati nel corso della Storia possono essere raggruppati in quattro classi:
- Orologi a pendolo che utilizzano la forza di gravità
- Orologi a molla
- Orologi al quarzo (o basati su circuiti elettrici risonanti)
- Orologi la cui frequenza campione è costituita da una radiazione elettromagnetica (classe EM)
- Alla classe EM appartengono, per esempio, gli orologi atomici, gli orologi ottici, quelli basati su maser o cavità risonanti

- Gli orologi a pendolo si basano sulla loro interazione con la forza gravitazionale. Per questo motivo, essi non possono aspirare ad essere un orologio ideale: la loro frequenza campione dipende dalla loro posizione nel campo gravitazionale.

Classi di orologi. II

- Gli orologi a pendolo si basano sulla loro interazione con la forza gravitazionale. Per questo motivo, essi non possono aspirare ad essere un orologio ideale: la loro frequenza campione dipende dalla loro posizione nel campo gravitazionale.
- Essi non funzionano in assenza di gravità; in particolare, non funzionano in caduta libera

Classi di orologi. II

- Gli orologi a pendolo si basano sulla loro interazione con la forza gravitazionale. Per questo motivo, essi non possono aspirare ad essere un orologio ideale: la loro frequenza campione dipende dalla loro posizione nel campo gravitazionale.
- Essi non funzionano in assenza di gravità; in particolare, non funzionano in caduta libera
- Gli orologi a pendolo non verranno pertanto più considerati

Relatività speciale e quanti di luce

- La relatività speciale e l'ipotesi dei quanti di luce furono concepiti da Einstein nel 1905 \Rightarrow ERQ [pp. 123 - 134]. Einstein ha sempre tenuto separati questi due campi, sebbene essi fossero strettamente connessi, come ha dimostrato Erwing Schrödinger nel 1922, ricavando le formule relativistiche dell'effetto Doppler per la luce, considerata come composta da quanti di luce

Relatività speciale e quanti di luce

- La relatività speciale e l'ipotesi dei quanti di luce furono concepiti da Einstein nel 1905 \Rightarrow ERQ [pp. 123 - 134]. Einstein ha sempre tenuto separati questi due campi, sebbene essi fossero strettamente connessi, come ha dimostrato Erwing Scrödinger nel 1922, ricavando le formule relativistiche dell'effetto Doppler per la luce, **considerata come composta da quanti di luce**
- Scrödinger applicò le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione di un quanto di luce da parte di un atomo in moto

Relatività speciale e quanti di luce

- La relatività speciale e l'ipotesi dei quanti di luce furono concepiti da Einstein nel 1905 ⇒ **ERQ** [pp. 123 - 134]. Einstein ha sempre tenuto separati questi due campi, sebbene essi fossero strettamente connessi, come ha dimostrato Erwing Scrödinger nel 1922, ricavando le formule relativistiche dell'effetto Doppler per la luce, **considerata come composta da quanti di luce**
- Scrödinger applicò le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione di un quanto di luce da parte di un atomo in moto
- Nel 1923, Louis de Broglie – con estrema disinvoltura – associò ad un atomo in quiete un 'moto periodico semplice di frequenza tale che' **in rete qui**:

$$h\nu_0 = m_0c^2$$

Relatività speciale e quanti di luce

- La relatività speciale e l'ipotesi dei quanti di luce furono concepiti da Einstein nel 1905 ⇒ ERQ [pp. 123 - 134]. Einstein ha sempre tenuto separati questi due campi, sebbene essi fossero strettamente connessi, come ha dimostrato Erwing Scrödinger nel 1922, ricavando le formule relativistiche dell'effetto Doppler per la luce, **considerata come composta da quanti di luce**
- Scrödinger applicò le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione di un quanto di luce da parte di un atomo in moto
- Nel 1923, Louis de Broglie – con estrema disinvoltura – associò ad un atomo in quiete un 'moto periodico semplice di frequenza tale che' **in rete qui:**

$$h\nu_0 = m_0c^2$$

- Questo passaggio, inconcepibile per Einstein, era stato verosimilmente suggerito a de Broglie dalla sua precedente supposizione che i quanti di luce avessero massa non nulla, sebbene 'piccolissima' **qui:**

Relatività speciale e quanti di luce

- La relatività speciale e l'ipotesi dei quanti di luce furono concepiti da Einstein nel 1905 ⇒ **ERQ** [pp. 123 - 134]. Einstein ha sempre tenuto separati questi due campi, sebbene essi fossero strettamente connessi, come ha dimostrato Erwing Scrödinger nel 1922, ricavando le formule relativistiche dell'effetto Doppler per la luce, **considerata come composta da quanti di luce**
- Scrödinger applicò le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto al processo di emissione di un quanto di luce da parte di un atomo in moto
- Nel 1923, Louis de Broglie – con estrema disinvoltura – associò ad un atomo in quiete un 'moto periodico semplice di frequenza tale che' **in rete qui**:

$$h\nu_0 = m_0c^2$$

- Questo passaggio, inconcepibile per Einstein, era stato verosimilmente suggerito a de Broglie dalla sua precedente supposizione che i quanti di luce avessero massa non nulla, sebbene 'piccolissima' **qui**:
- se un quanto di luce, cui è associata una frequenza mediante la relazione $E = h\nu$, possiede una massa, perché un corpo massivo non potrebbe avere una frequenza associata? 

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]
- Essi avevano in comune l'idea che l'elettrone avesse dimensioni finite e che, pertanto, nella dinamica dell'elettrone, dovessero comparire anche le forze che l'elettrone esercita su sé stesso

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]
- Essi avevano in comune l'idea che l'elettrone avesse dimensioni finite e che, pertanto, nella dinamica dell'elettrone, dovessero comparire anche le forze che l'elettrone esercita su sé stesso
- In questo contesto, nasceva l'ipotesi che – tutta o in parte – la massa dell'elettrone avesse origine elettromagnetica

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]
- Essi avevano in comune l'idea che l'elettrone avesse dimensioni finite e che, pertanto, nella dinamica dell'elettrone, dovessero comparire anche le forze che l'elettrone esercita su sé stesso
- In questo contesto, nasceva l'ipotesi che – tutta o in parte – la massa dell'elettrone avesse origine elettromagnetica
- Era questo un capovolgimento dell'approccio di Maxwell, che – sovente – si ispirava a modelli meccanici per studiare i fenomeni elettromagnetici

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]
- Essi avevano in comune l'idea che l'elettrone avesse dimensioni finite e che, pertanto, nella dinamica dell'elettrone, dovessero comparire anche le forze che l'elettrone esercita su sé stesso
- In questo contesto, nasceva l'ipotesi che – tutta o in parte – la massa dell'elettrone avesse origine elettromagnetica
- Era questo un capovolgimento dell'approccio di Maxwell, che – sovente – si ispirava a modelli meccanici per studiare i fenomeni elettromagnetici
- Questo argomento è stato ampiamente trattato dagli storici della fisica

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. I

- Nei primi anni del Novecento, apparvero alcuni modelli dell'elettrone: Abraham, Bucherer, Langevin e Lorentz \Rightarrow Feynman, *Lezioni* [secondo vol. capitolo 28]
- Essi avevano in comune l'idea che l'elettrone avesse dimensioni finite e che, pertanto, nella dinamica dell'elettrone, dovessero comparire anche le forze che l'elettrone esercita su sé stesso
- In questo contesto, nasceva l'ipotesi che – tutta o in parte – la massa dell'elettrone avesse origine elettromagnetica
- Era questo un capovolgimento dell'approccio di Maxwell, che – sovente – si ispirava a modelli meccanici per studiare i fenomeni elettromagnetici
- Questo argomento è stato ampiamente trattato dagli storici della fisica
- Tra questi: McCormach (1970), Miller (Special Relativity, 1981), Pais (Subtle is the Lord, 1982), Cushing (1981), Janssen e Mecklenburg **qui**

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. II

- Tutti i modelli avevano in comune l'uso della meccanica newtoniana, della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ e dell'ipotesi che l'elettrone **in quiete rispetto all'Etere** fosse una sfera con la carica distribuita uniformemente sulla superficie

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. II

- Tutti i modelli avevano in comune l'uso della meccanica newtoniana, della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ e dell'ipotesi che l'elettrone **in quiete rispetto all'Etere** fosse una sfera con la carica distribuita uniformemente sulla superficie
- Essi differivano nell'uso della “contrazione di Lorentz” intesa come una contrazione effettiva e non dovuta ai diversi punti di vista dei due SRI (quello dell'Etere e quello comovente con la carica)

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. II

- Tutti i modelli avevano in comune l'uso della meccanica newtoniana, della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ e dell'ipotesi che l'elettrone **in quiete rispetto all'Etere** fosse una sfera con la carica distribuita uniformemente sulla superficie
- Essi differivano nell'uso della “contrazione di Lorentz” intesa come una contrazione effettiva e non dovuta ai diversi punti di vista dei due SRI (quello dell'Etere e quello comovente con la carica)
- Abraham ignorava la “contrazione” (elettrone “rigido”)

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. II

- Tutti i modelli avevano in comune l'uso della meccanica newtoniana, della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ e dell'ipotesi che l'elettrone **in quiete rispetto all'Etere** fosse una sfera con la carica distribuita uniformemente sulla superficie
- Essi differivano nell'uso della “contrazione di Lorentz” intesa come una contrazione effettiva e non dovuta ai diversi punti di vista dei due SRI (quello dell'Etere e quello comovente con la carica)
- Abraham ignorava la “contrazione” (elettrone “rigido”)
- Lorentz ne teneva conto

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. II

- Tutti i modelli avevano in comune l'uso della meccanica newtoniana, della forza di Lorentz $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ e dell'ipotesi che l'elettrone **in quiete rispetto all'Etere** fosse una sfera con la carica distribuita uniformemente sulla superficie
- Essi differivano nell'uso della “contrazione di Lorentz” intesa come una contrazione effettiva e non dovuta ai diversi punti di vista dei due SRI (quello dell'Etere e quello comovente con la carica)
- Abraham ignorava la “contrazione” (elettrone “rigido”)
- Lorentz ne teneva conto
- Bucherer e Langevin ne tenevano conto ma supponevano che l'elettrone, nelle altre due dimensioni, si ingrandisse in modo tale da mantenere costante il suo volume

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. III

- Alla luce della relatività speciale, appare evidente che con questi modelli non si sarebbe andati molto lontano

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. III

- Alla luce della relatività speciale, appare evidente che con questi modelli non si sarebbe andati molto lontano
- Nel 1908 durante la discussione di una comunicazione presentata da Bucherer, Minkowski definì l'ipotesi dell'elettrone rigido di Abraham un "mostro" e "non una ipotesi di lavoro" ma "un ostacolo al lavoro"

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. III

- Alla luce della relatività speciale, appare evidente che con questi modelli non si sarebbe andati molto lontano
- Nel 1908 durante la discussione di una comunicazione presentata da Bucherer, Minkowski definì l'ipotesi dell'elettrone rigido di Abraham un "mostro" e "non una ipotesi di lavoro" ma "un ostacolo al lavoro"
- La situazione sperimentale era caratterizzata dalle misure di Kaufmann e Bucherer, sulla cui capacità di decidere tra i tre modelli proposti hanno espresso una ponderata, definitiva, sentenza negativa Zahn e Speer 1938

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. III

- Alla luce della relatività speciale, appare evidente che con questi modelli non si sarebbe andati molto lontano
- Nel 1908 durante la discussione di una comunicazione presentata da Bucherer, Minkowski definì l'ipotesi dell'elettrone rigido di Abraham un "mostro" e "non una ipotesi di lavoro" ma "un ostacolo al lavoro"
- La situazione sperimentale era caratterizzata dalle misure di Kaufmann e Bucherer, sulla cui capacità di decidere tra i tre modelli proposti hanno espresso una ponderata, definitiva, sentenza negativa Zahn e Spees 1938
- Tuttavia: dagli esperimenti appariva che il rapporto e/m_{elem} dell'elettrone dipendeva dalla sua velocità secondo la formula:

$$\frac{e}{m_{elem}} = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

I modelli dell'elettrone esteso: 1900 circa. III

- Alla luce della relatività speciale, appare evidente che con questi modelli non si sarebbe andati molto lontano
- Nel 1908 durante la discussione di una comunicazione presentata da Bucherer, Minkowski definì l'ipotesi dell'elettrone rigido di Abraham un "mostro" e "non una ipotesi di lavoro" ma "un ostacolo al lavoro"
- La situazione sperimentale era caratterizzata dalle misure di Kaufmann e Bucherer, sulla cui capacità di decidere tra i tre modelli proposti hanno espresso una ponderata, definitiva, sentenza negativa Zahn e Spees 1938
- Tuttavia: dagli esperimenti appariva che il rapporto e/m_{elem} dell'elettrone dipendeva dalla sua velocità secondo la formula:

$$\frac{e}{m_{elem}} = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- Questa formula fu interpretata affermando che la massa (elettromagnetica) dell'elettrone in moto con velocità v può essere espressa come

$$m_{elem} = \gamma m$$

La grandezza m_{elem} , scritta come m_{rel} , verrà poi chiamata "massa relativistica" e sarà l'origine di molti fraintendimenti di natura concettuale. Si veda il bel lavoro [di Giulio Passatore](#)

- Einstein non partecipò al dibattito sui modelli dell'elettrone.

- Einstein non partecipò al dibattito sui modelli dell'elettrone.
- Nella dinamica relativistica l'equazione di moto dell'elettrone è \Rightarrow ERQ [pp. 191 - 200; 267 - 272]:

$$\vec{f} = m \frac{d(\gamma \vec{v})}{dt}$$

dove m è la massa dell'elettrone e $(\gamma \vec{v})$ la componente tridimensionale del quadrivettore velocità

- Einstein non partecipò al dibattito sui modelli dell'elettrone.
- Nella dinamica relativistica l'equazione di moto dell'elettrone è \Rightarrow ERQ [pp. 191 - 200; 267 - 272]:

$$\vec{f} = m \frac{d(\gamma \vec{v})}{dt}$$

dove m è la massa dell'elettrone e $(\gamma \vec{v})$ la componente tridimensionale del quadrivettore velocità

- Nella dinamica relativistica, la massa **non è più una misura della sua inerzia...**

- Einstein non partecipò al dibattito sui modelli dell'elettrone.
- Nella dinamica relativistica l'equazione di moto dell'elettrone è \Rightarrow ERQ [pp. 191 - 200; 267 - 272]:

$$\vec{f} = m \frac{d(\gamma \vec{v})}{dt}$$

dove m è la massa dell'elettrone e $(\gamma \vec{v})$ la componente tridimensionale del quadrivettore velocità

- Nella dinamica relativistica, la massa non è più una misura della sua inerzia...
- ... ma una misura della sua energia a riposo: $E = mc^2$ (Einstein, settembre 1905)

- La relatività speciale è dunque nata in modo assiomatico con il lavoro del 1905 [qui](#)

- La relatività speciale è dunque nata in modo assiomatico con il lavoro del 1905 **qui**
- Negli anni immediatamente successivi, il dibattito si concentrò sulle questioni teoriche, intrecciando – inevitabilmente – questioni fisiche, epistemologiche e filosofiche

- La relatività speciale è dunque nata in modo assiomatico con il lavoro del 1905 **qui**
- Negli anni immediatamente successivi, il dibattito si concentrò sulle questioni teoriche, intrecciando – inevitabilmente – questioni fisiche, epistemologiche e filosofiche
- La discussione riguardava principalmente gli aspetti più appariscenti: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze, paradosso degli orologi (dei gemelli)

- La relatività speciale è dunque nata in modo assiomatico con il lavoro del 1905 **qui**
- Negli anni immediatamente successivi, il dibattito si concentrò sulle questioni teoriche, intrecciando – inevitabilmente – questioni fisiche, epistemologiche e filosofiche
- La discussione riguardava principalmente gli aspetti più appariscenti: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze, paradosso degli orologi (dei gemelli)
- La questione dell'energia a riposo rimaneva, invece, in ombra

- La relatività speciale è dunque nata in modo assiomatico con il lavoro del 1905 **qui**
- Negli anni immediatamente successivi, il dibattito si concentrò sulle questioni teoriche, intrecciando – inevitabilmente – questioni fisiche, epistemologiche e filosofiche
- La discussione riguardava principalmente gli aspetti più appariscenti: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze, paradosso degli orologi (dei gemelli)
- La questione dell'energia a riposo rimaneva, invece, in ombra
- Infatti, il giovane Fermi scriveva nel 1922:

- “La grandiosa importanza concettuale della teoria della relatività, come contributo ad una più profonda comprensione dei rapporti tra spazio e tempo, e le vivaci e spesso appassionate discussioni a cui essa ha in conseguenza dato luogo anche fuori degli ambienti strettamente scientifici, hanno forse un po' distolta l'attenzione da un altro suo risultato che, per esser meno clamoroso e, diciamo pure, meno paradossale, ha tuttavia nella fisica conseguenze non meno degne di nota, ed il cui interesse è verosimilmente destinato a crescere nel prossimo svilupparsi della scienza. Il risultato a cui accenniamo è la scoperta della relazione che lega la massa di un corpo alla sua energia.”

- “La grandiosa importanza concettuale della teoria della relatività, come contributo ad una più profonda comprensione dei rapporti tra spazio e tempo, e le vivaci e spesso appassionante discussioni a cui essa ha in conseguenza dato luogo anche fuori degli ambienti strettamente scientifici, hanno forse un po' distolta l'attenzione da un altro suo risultato che, per esser meno clamoroso e, diciamo pure, meno paradossale, ha tuttavia nella fisica conseguenze non meno degne di nota, ed il cui interesse è verosimilmente destinato a crescere nel prossimo svilupparsi della scienza. Il risultato a cui accenniamo è la scoperta della relazione che lega la massa di un corpo alla sua energia.”
- e, poco oltre:

- “Si dirà con ragione che non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, **cosa del resto che non si può che augurarsi**, perché l’esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovar il modo di produrla.” ⇒ **qui**

- “Si dirà con ragione che non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, **cosa del resto che non si può che augurarsi**, perché l’esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovar il modo di produrla.” ⇒ **qui**
- Come sappiamo, l’auspicio non si avverò: e la trasformazione di parte di una massa in energia, dopo essere stata osservata in laboratorio, fu applicata alla costruzione della prima bomba nucleare. . .

- “Si dirà con ragione che non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, **cosa del resto che non si può che augurarsi**, perché l’esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovar il modo di produrla.” ⇒ **qui**
- Come sappiamo, l’auspicio non si avverò: e la trasformazione di parte di una massa in energia, dopo essere stata osservata in laboratorio, fu applicata alla costruzione della prima bomba nucleare...
- ... e, in una delle tante torsioni della storia, Fermi contribuì all’impresa

Quali verifiche sperimentali?

- Osservando le predizioni della relatività speciale, possiamo individuare un elenco **parziale** di possibili verifiche sperimentali

Quali verifiche sperimentali?

- Osservando le predizioni della relatività speciale, possiamo individuare un elenco **parziale** di possibili verifiche sperimentali
- Cinematica: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze \Rightarrow **ERQ** [pp. 255 - 264]

Quali verifiche sperimentali?

- Osservando le predizioni della relatività speciale, possiamo individuare un elenco **parziale** di possibili verifiche sperimentali
- Cinematica: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze \Rightarrow **ERQ** [pp. 255 - 264]
- Effetto viaggio (paradosso degli orologi risolto)

Quali verifiche sperimentali?

- Osservando le predizioni della relatività speciale, possiamo individuare un elenco **parziale** di possibili verifiche sperimentali
- Cinematica: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze \Rightarrow ERQ [pp. 255 - 264]
- Effetto viaggio (paradosso degli orologi risolto)
- Equazioni della dinamica \rightarrow effetto Doppler per i fotoni $\rightarrow E = mc^2$

Quali verifiche sperimentali?

- Osservando le predizioni della relatività speciale, possiamo individuare un elenco **parziale** di possibili verifiche sperimentali
- Cinematica: dilatazione del tempo, contrazione delle lunghezze \Rightarrow ERQ [pp. 255 - 264]
- Effetto viaggio (paradosso degli orologi risolto)
- Equazioni della dinamica \rightarrow effetto Doppler per i fotoni $\rightarrow E = mc^2$
- Verifica diretta di $E = mc^2$

Einstein, 1907: effetto Doppler

- La prima proposta di verifica sperimentale di una predizione della relatività speciale fu formulata dallo stesso Einstein nel 1907 [qui](#)

Einstein, 1907: effetto Doppler

- La prima proposta di verifica sperimentale di una predizione della relatività speciale fu formulata dallo stesso Einstein nel 1907 [qui](#)
- In seguito alle misure di Stark [sull'effetto Doppler](#) mostrato da atomi in moto rispetto al laboratorio – misure che dimostravano che le frequenze emesse dagli atomi in moto sono diverse da quelle emesse dagli atomi in quiete – Einstein mostrò come questo effetto possa essere dedotto all'interno della sua teoria

Einstein, 1907: effetto Doppler

- La prima proposta di verifica sperimentale di una predizione della relatività speciale fu formulata dallo stesso Einstein nel 1907 [qui](#)
- In seguito alle misure di Stark [sull'effetto Doppler](#) mostrato da atomi in moto rispetto al laboratorio – misure che dimostravano che le frequenze emesse dagli atomi in moto sono diverse da quelle emesse dagli atomi in quiete – Einstein mostrò come questo effetto possa essere dedotto all'interno della sua teoria
- (La prima misura dell'effetto Doppler per la luce è dovuta a Herman Vogel (1891). Vogel misurò lo spostamento di diverse righe emesse da stelle in moto lungo la direzione di emissione della luce)

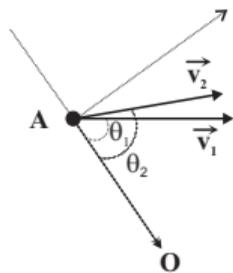
Einstein, 1907: effetto Doppler

- La prima proposta di verifica sperimentale di una predizione della relatività speciale fu formulata dallo stesso Einstein nel 1907 [qui](#)
- In seguito alle misure di Stark [sull'effetto Doppler](#) mostrato da atomi in moto rispetto al laboratorio – misure che dimostravano che le frequenze emesse dagli atomi in moto sono diverse da quelle emesse dagli atomi in quiete – Einstein mostrò come questo effetto possa essere dedotto all'interno della sua teoria
- (La prima misura dell'effetto Doppler per la luce è dovuta a Herman Vogel (1891). Vogel misurò lo spostamento di diverse righe emesse da stelle in moto lungo la direzione di emissione della luce)
- Einstein considerò un atomo in volo come un orologio. Di conseguenza, l'atomo, essendo un orologio, doveva mostrare la dilatazione del tempo: le frequenze emesse dall'atomo, dovevano dipendere dalla sua velocità come l'inverso dell'intervallo di tempo tra un click e l'altro dell'orologio

Einstein, 1907: effetto Doppler

- La prima proposta di verifica sperimentale di una predizione della relatività speciale fu formulata dallo stesso Einstein nel 1907 [qui](#)
- In seguito alle misure di Stark [sull'effetto Doppler](#) mostrato da atomi in moto rispetto al laboratorio – misure che dimostravano che le frequenze emesse dagli atomi in moto sono diverse da quelle emesse dagli atomi in quiete – Einstein mostrò come questo effetto possa essere dedotto all'interno della sua teoria
- (La prima misura dell'effetto Doppler per la luce è dovuta a Herman Vogel (1891). Vogel misurò lo spostamento di diverse righe emesse da stelle in moto lungo la direzione di emissione della luce)
- Einstein considerò un atomo in volo come un orologio. Di conseguenza, l'atomo, essendo un orologio, doveva mostrare la dilatazione del tempo: le frequenze emesse dall'atomo, dovevano dipendere dalla sua velocità come l'inverso dell'intervallo di tempo tra un click e l'altro dell'orologio
- In realtà, Einstein avrebbe dovuto riferirsi alla frequenza campione di un orologio, frequenza campione che, vista da un altro SRI, obbedisce all'effetto Doppler. Tuttavia, il seme contenuto nel lavoro di Einstein sbocciò qualche anno dopo grazie a [Schrödinger](#)

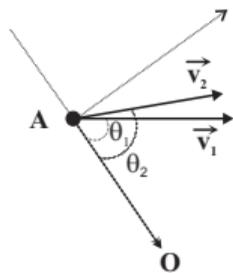
Schrödinger: conservazione dell'energia e della quantità di moto



- Conservazione dell'energia

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 + E_{ph}$$

Schrödinger: conservazione dell'energia e della quantità di moto



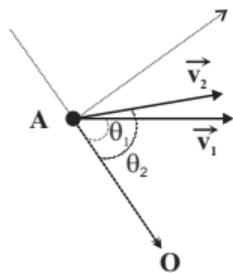
- Conservazione dell'energia

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 + E_{ph}$$

- Conservazione della quantità di moto lungo la direzione di emissione del fotone

$$\gamma_1 \frac{E_1^{emi}}{c^2} v_1 \cos \theta_1 = \gamma_2 \frac{E_2^{emi}}{c^2} v_2 \cos \theta_2 + \frac{E_{ph}}{c}$$

Schrödinger: conservazione dell'energia e della quantità di moto



- Conservazione dell'energia

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 + E_{ph}$$

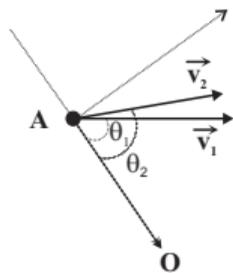
- Conservazione della quantità di moto lungo la direzione di emissione del fotone

$$\gamma_1 \frac{E_1^{emi}}{c^2} v_1 \cos \theta_1 = \gamma_2 \frac{E_2^{emi}}{c^2} v_2 \cos \theta_2 + \frac{E_{ph}}{c}$$

- Conservazione della quantità di moto lungo la direzione \perp alla direzione di emissione del fotone

$$\gamma_1 \frac{E_1^{emi}}{c^2} v_1 \sin \theta_1 = \gamma_2 \frac{E_2^{emi}}{c^2} v_2 \sin \theta_2$$

Schrödinger: conservazione dell'energia e della quantità di moto



- Conservazione dell'energia

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 + E_{ph}$$

- Conservazione della quantità di moto lungo la direzione di emissione del fotone

$$\gamma_1 \frac{E_1^{emi}}{c^2} v_1 \cos \theta_1 = \gamma_2 \frac{E_2^{emi}}{c^2} v_2 \cos \theta_2 + \frac{E_{ph}}{c}$$

- Conservazione della quantità di moto lungo la direzione \perp alla direzione di emissione del fotone

$$\gamma_1 \frac{E_1^{emi}}{c^2} v_1 \sin \theta_1 = \gamma_2 \frac{E_2^{emi}}{c^2} v_2 \sin \theta_2$$

- $E_1 - E_2 = \Delta E$ ΔE è un invariante relativistico

Emissione/assorbimento di un quanto di luce



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

Emissione/assorbimento di un quanto di luce

$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{abs}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

Emissione/assorbimento di un quanto di luce

$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2E_1^{emi}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{emi}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2E_1^{abs}} \right) \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1} \\ &= E_{abs}^0 \frac{\sqrt{1 - B_1^2}}{1 - B_1 \cos \theta_1}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c} \end{aligned}$$

- E_{emi}^0 e E_{abs}^0 sono invarianti relativistici \Rightarrow ERQ [pp. 132 - 143]

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica... ”
- ... Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta... ”
- ... come pure **l'assai controversa presenza di un rinculo**, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica... ”

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .
- . . . come pure **l'assai controversa presenza di un rinculo**, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica. . . ”
- Il rallentamento con luce laser di ioni in moto a velocità relativistiche è stato misurato nel 1990 **pp. 17 - 18**

Schrödinger, conclusione

- “ La velocità acquisita in seguito al rinculo è in generale assai piccola rispetto a quella termica. . .
- . . . Altrimenti sarebbe di notevole interesse verificare l'interpretazione quantistica dell'effetto Doppler qui esposta. . .
- . . . come pure **l'assai controversa presenza di un rinculo**, così difficilmente conciliabile con l'ottica classica. . . ”
- Il rallentamento con luce laser di ioni in moto a velocità relativistiche è stato misurato nel 1990 **pp. 17 - 18**
- Il raffreddamento di un gas monoatomico mediante luce laser si basa sullo scambio di quantità di moto tra fotoni e atomi. Anche la spettroscopia di saturazione si basa su questo scambio.

L'energia di rinculo dell'atomo

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in quiete, può essere scritta come:

$$E_0^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2(mc^2 + \Delta E)} \right) \quad (1)$$

L'energia di rinculo dell'atomo

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in quiete, può essere scritta come:

$$E_0^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2(mc^2 + \Delta E)} \right) \quad (1)$$

- E l'energia di un fotone assorbito da un atomo in quiete come:

$$E_0^{abs} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2mc^2} \right) \quad (2)$$

L'energia di rinculo dell'atomo

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in quiete, può essere scritta come:

$$E_0^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2(mc^2 + \Delta E)} \right) \quad (1)$$

- E l'energia di un fotone assorbito da un atomo in quiete come:

$$E_0^{abs} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2mc^2} \right) \quad (2)$$

- Se $\Delta E \ll mc^2$, condizione soddisfatta nel caso di atomi (ma non sempre nel caso di nuclei), possiamo scrivere:

$$E_0^{emi} = \Delta E(1 - B_T); \quad E_0^{abs} = \Delta E(1 + B_T); \quad B_T = \frac{\Delta E^2}{2mc^2} \quad (3)$$

L'energia di rinculo dell'atomo

- L'energia di un fotone emesso da un atomo in quiete, può essere scritta come:

$$E_0^{emi} = \Delta E \left(1 - \frac{\Delta E}{2(mc^2 + \Delta E)} \right) \quad (1)$$

- E l'energia di un fotone assorbito da un atomo in quiete come:

$$E_0^{abs} = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta E}{2mc^2} \right) \quad (2)$$

- Se $\Delta E \ll mc^2$, condizione soddisfatta nel caso di atomi (ma non sempre nel caso di nuclei), possiamo scrivere:

$$E_0^{emi} = \Delta E(1 - B_T); \quad E_0^{abs} = \Delta E(1 + B_T); \quad B_T = \frac{\Delta E^2}{2mc^2} \quad (3)$$

- O, anche:

$$E_0^{emi} = \Delta E - E_R; \quad E_0^{abs} = \Delta E + E_R \quad (4)$$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo \mathbf{E} in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R$$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R$$

- **SE** un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R$$

- **SE** un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

- Quindi: $\Delta E_{abs} - \Delta E_{emi} = -2E_R$

Emissione e assorbimento di un fotone: risonanza.

- Supponiamo che un atomo **E** in quiete emetta un fotone di energia E_{emi}^0 lungo la direzione positiva dell'asse x
- L'energia del fotone emesso è data da:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{emi} - E_R$$

- **SE** un atomo identico **A**, posto in quiete sull'asse x , assorbe il fotone emesso da **E**, deve essere:

$$E_{emi}^0 = \Delta E_{abs} + E_R$$

- Quindi: $\Delta E_{abs} - \Delta E_{emi} = -2E_R$
- Cioè l'energia di transizione tra due livelli energetici **NON** può essere esattamente definita: **DEVE** esistere una **larghezza naturale** della riga di emissione/assorbimento il cui ordine di grandezza deve essere di $\approx 2E_R$

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di E_R/c^2

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di E_R/c^2
- Durante l'intero processo, è stata persa una massa pari $2E_R/c^2$

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di E_R/c^2
- Durante l'intero processo, **è stata persa una massa** pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita nell'energia cinetica di rinculo dei due atomi.

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di E_R/c^2
- Durante l'intero processo, **è stata persa una massa** pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita nell'energia cinetica di rinculo dei due atomi.
- **La trasformazione massa \iff energia opera anche nei processi di emissione o assorbimento di fotoni da parte di atomi o nuclei e non solo nei processi di fissione o fusione di nuclei.**

Emissione e assorbimento di un fotone: difetto di massa.

- Durante l'emissione, la massa dell'atomo **E** diminuisce di una quantità pari a E_R/c^2
- Durante l'assorbimento, la massa dell'atomo **A** aumenta di E_R/c^2
- Durante l'intero processo, **è stata persa una massa** pari $2E_R/c^2$
- L'energia corrispondente a questa massa ed uguale a $2E_R$ è finita nell'energia cinetica di rinculo dei due atomi.
- **La trasformazione massa \iff energia opera anche nei processi di emissione o assorbimento di fotoni da parte di atomi o nuclei e non solo nei processi di fissione o fusione di nuclei.**
- Naturalmente, gli ordini di grandezza delle energie coinvolte nei due processi sono assai diversi.

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana \Rightarrow ERQ [pp. 274 - 276].

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana \Rightarrow ERQ [pp. 274 - 276].
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana \Rightarrow ERQ [pp. 274 - 276].
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana \Rightarrow ERQ [pp. 274 - 276].
- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

- Come si vede, in una trattazione newtoniana compare l'energia a riposo dell'atomo mc^2 .

Assorbimento di un fotone: dinamica newtoniana

- È interessante trattare l'assorbimento di un fotone da parte di un atomo in moto con la dinamica newtoniana \Rightarrow ERQ [pp. 274 - 276].

- Nel caso semplice in cui l'atomo assorbe un fotone in una collisione frontale, si ottiene:

$$E_{ph} = \Delta E(1 + B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- Se l'atomo è inizialmente in quiete, dopo l'assorbimento la sua energia cinetica (energia di rinculo) è:

$$E_R = \frac{\Delta E^2}{2mc^2}$$

- Come si vede, in una trattazione newtoniana compare l'energia a riposo dell'atomo mc^2 .
- Ciò è dovuto al fatto che, nell'equazione di conservazione della quantità di moto è stata inserita la quantità di moto del fotone E_{ph}/c

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Compton, nella spiegazione corpuscolare dell'effetto che porta il suo nome, usa le leggi di conservazione, ma non cita il precedente di Schrödinger

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Compton, nella spiegazione corpuscolare dell'effetto che porta il suo nome, usa le leggi di conservazione, ma non cita il precedente di Schrödinger
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Compton, nella spiegazione corpuscolare dell'effetto che porta il suo nome, usa le leggi di conservazione, ma non cita il precedente di Schrödinger
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.
- Fermi E., (1932), Quantum theory of radiation, *Rev. Mod. Phys.*, **4**, 87-132. Tratta l'emissione di un fotone usando la dinamica newtoniana.

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. I

- Il lavoro di Schrödinger, se adeguatamente sviluppato, contiene più fisica di quella annunciata nel titolo
- L'articolo è stato ignorato dai contemporanei e da coloro che, successivamente, hanno trattato lo stesso argomento
- Compton, nella spiegazione corpuscolare dell'effetto che porta il suo nome, usa le leggi di conservazione, ma non cita il precedente di Schrödinger
- Juancey G. E. M., (1926), Conservation of momentum and the Doppler principle, *Nature*, **117** 343-344. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto.
- Fermi E., (1932), Quantum theory of radiation, *Rev. Mod. Phys.*, **4**, 87-132. Tratta l'emissione di un fotone usando la dinamica newtoniana.
- Davisson C. J. (1938). The Theory of the Transverse Doppler Effect, *Phys. Rev.*, **54** , 90-91. Trattazione basata, come quella di Schrödinger, sulla conservazione relativistica dell'energia e della quantità di moto. Non cita nè Schrödinger nè Juancey.

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. II

- Nei manuali, [French, 1968](#) e [Møller, 1972](#) trattano in dettaglio l'argomento senza però citare il lavoro di Schrödinger

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. II

- Nei manuali, [French, 1968](#) e [Møller, 1972](#) trattano in dettaglio l'argomento senza però citare il lavoro di Schrödinger
- In letteratura, tutti gli esperimenti sull'effetto Doppler sono trattati con la descrizione ondulatoria della luce

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. II

- Nei manuali, [French, 1968](#) e [Møller, 1972](#) trattano in dettaglio l'argomento senza però citare il lavoro di Schrödinger
- In letteratura, tutti gli esperimenti sull'effetto Doppler sono trattati con la descrizione ondulatoria della luce
- In questo modo, si perdono tutti i dettagli fisici dei processi di emissione o assorbimento

L'articolo di Schrödinger è stato ignorato. II

- Nei manuali, **French, 1968** e **Møller, 1972** trattano in dettaglio l'argomento senza però citare il lavoro di Schrödinger
- In letteratura, tutti gli esperimenti sull'effetto Doppler sono trattati con la descrizione ondulatoria della luce
- In questo modo, si perdono tutti i dettagli fisici dei processi di emissione o assorbimento
- Ciò dimostra che i fisici continuano a considerare la descrizione corpuscolare della luce come uno strumento **ad hoc** da usare solo in casi di estrema necessità, come, per esempio, nell'effetto Compton

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- Questi esperimenti verificano la **dinamica relativistica**. In particolare:

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- Questi esperimenti verificano la dinamica relativistica. In particolare:
- L'esistenza del fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tipico della dilatazione del tempo

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- Questi esperimenti verificano la dinamica relativistica. In particolare:
- L'esistenza del fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tipico della dilatazione del tempo
- La relazione $E = mc^2$ per una massa a riposo

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- Questi esperimenti verificano la dinamica relativistica. In particolare:
- L'esistenza del fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tipico della dilatazione del tempo
- La relazione $E = mc^2$ per una massa a riposo
- L'esistenza dell'energia di rinculo di un atomo/nucleo durante l'emissione/assorbimento di un fotone

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- **Questi esperimenti verificano la dinamica relativistica.** In particolare:
- L'esistenza del fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tipico della dilatazione del tempo
- La relazione $E = mc^2$ per una massa a riposo
- L'esistenza dell'energia di rinculo di un atomo/nucleo durante l'emissione/assorbimento di un fotone
- Le relazioni $E_{ph} = h\nu$ e $p_{ph} = h\nu/c$ per i fotoni

Che cosa verificano gli esperimenti sull'effetto Doppler?

- Questi esperimenti verificano la dinamica relativistica. In particolare:
- L'esistenza del fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tipico della dilatazione del tempo
- La relazione $E = mc^2$ per una massa a riposo
- L'esistenza dell'energia di rinculo di un atomo/nucleo durante l'emissione/assorbimento di un fotone
- Le relazioni $E_{ph} = h\nu$ e $p_{ph} = h\nu/c$ per i fotoni
- La trasformazione della massa in energia

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- Tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei:
Giuliani, 2013

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- Tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei:
[Giuliani, 2013](#)
- L'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti: [Giuliani, 2014](#)

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- Tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei:
[Giuliani, 2013](#)
- L'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti: [Giuliani, 2014](#)
- Il raffreddamento laser di atomi a due livelli: [Giuliani, 2015](#)

Applicazioni della trattazione alla Schrödinger

- La trattazione 'alla Schrödinger' descrive:
- Tutti gli esperimenti condotti sull'effetto Doppler riguardanti atomi o nuclei:
[Giuliani, 2013](#)
- L'emissione/assorbimento di fotoni gamma senza rinculo (effetto Mössbauer) su dispositivi rotanti: [Giuliani, 2014](#)
- Il raffreddamento laser di atomi a due livelli: [Giuliani, 2015](#)
- Tutti questi argomenti sono trattati in: [Buonaura e Giuliani, 2016](#)

Ives e Stilwell, 1938

- Quando Ives e Stilwell, nel 1938 pp. 1040 - 1041, realizzarono il primo esperimento teso a verificare l'effetto Doppler per la luce emessa da atomi in moto, essi usarono la descrizione ondulatoria della luce e . . .

Ives e Stilwell, 1938

- Quando Ives e Stilwell, nel 1938 pp. 1040 - 1041, realizzarono il primo esperimento teso a verificare l'effetto Doppler per la luce emessa da atomi in moto, essi usarono la descrizione ondulatoria della luce e . . .
- . . . interpretarono i risultati sulla base di una teoria alternativa – basata sull'Etere – alla relatività speciale

Ives e Stilwell, 1938

- Quando Ives e Stilwell, nel 1938 pp. 1040 - 1041, realizzarono il primo esperimento teso a verificare l'effetto Doppler per la luce emessa da atomi in moto, essi usarono la descrizione ondulatoria della luce e . . .
- . . . interpretarono i risultati sulla base di una teoria alternativa – basata sull'Etere – alla relatività speciale
- Per un'altra beffarda torsione della storia, la prima verifica sperimentale dell'effetto Doppler prevista da Einstein nel 1907, fu realizzata e interpretata da un anti - relativista (Ives)

Ives e Stilwell, 1938

- Quando Ives e Stilwell, nel 1938 pp. 1040 - 1041, realizzarono il primo esperimento teso a verificare l'effetto Doppler per la luce emessa da atomi in moto, essi usarono la descrizione ondulatoria della luce e . . .
- . . . interpretarono i risultati sulla base di una teoria alternativa – basata sull'Etere – alla relatività speciale
- Per un'altra beffarda torsione della storia, la prima verifica sperimentale dell'effetto Doppler prevista da Einstein nel 1907, fu realizzata e interpretata da un anti - relativista (Ives)
- Il tipo di apparato sperimentale ideato da Ives e Stilwell è stato successivamente usato in molti altri esperimenti

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche
- Si tratta di misurare la lunghezza d'onda della radiazione emessa dagli atomi in avvicinamento e in allontanamento lungo una direzione che forma un piccolo angolo θ (avvicinamento) o $\pi - \theta$ (allontanamento) con la direzione di moto dell'atomo

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche
- Si tratta di misurare la lunghezza d'onda della radiazione emessa dagli atomi in avvicinamento e in allontanamento lungo una direzione che forma un piccolo angolo θ (avvicinamento) o $\pi - \theta$ (allontanamento) con la direzione di moto dell'atomo
- Si ha:

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche
- Si tratta di misurare la lunghezza d'onda della radiazione emessa dagli atomi in avvicinamento e in allontanamento lungo una direzione che forma un piccolo angolo θ (avvicinamento) o $\pi - \theta$ (allontanamento) con la direzione di moto dell'atomo
- Si ha:
- $\lambda_{avv} = \Gamma \lambda_0 (1 - B \cos \theta)$

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche
- Si tratta di misurare la lunghezza d'onda della radiazione emessa dagli atomi in avvicinamento e in allontanamento lungo una direzione che forma un piccolo angolo θ (avvicinamento) o $\pi - \theta$ (allontanamento) con la direzione di moto dell'atomo
- Si ha:
- $\lambda_{avv} = \Gamma \lambda_0 (1 - B \cos \theta)$
- $\lambda_{all} = \Gamma \lambda_0 (1 + B \cos \theta)$

Ives e Stilwell: l'esperimento

- L'esperimento è realizzato misurando la radiazione emessa da **molti atomi** in volo alla stessa velocità. Si può allora usare la descrizione ondulatoria della luce, ed esprimere i calcoli in termini di lunghezza d'onda misurata da uno spettroscopio a reticolo ed usando come rivelatore lastre fotografiche
- Si tratta di misurare la lunghezza d'onda della radiazione emessa dagli atomi in avvicinamento e in allontanamento lungo una direzione che forma un piccolo angolo θ (avvicinamento) o $\pi - \theta$ (allontanamento) con la direzione di moto dell'atomo
- Si ha:
- $\lambda_{avv} = \Gamma \lambda_0 (1 - B \cos \theta)$
- $\lambda_{all} = \Gamma \lambda_0 (1 + B \cos \theta)$
-

$$\lambda_{all} + \lambda_{avv} = 2\Gamma \lambda_0 \quad (5)$$

$$\lambda_{all} - \lambda_{avv} = 2\Gamma \lambda_0 B \cos \theta \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_{all} - \lambda_{avv}}{\lambda_{all} + \lambda_{avv}} = B \cos \theta \quad (7)$$

- L'esperimento di Ives e Stilwell fu ripetuto con maggiore accuratezza da Malderberg e Witten nel 1962: le velocità degli atomi di idrogeno non era molto diversa nei due casi:
 $5 \div 9 \times 10^{-3}c$

Altri esperimenti

- L'esperimento di Ives e Stilwell fu ripetuto con maggiore accuratezza da Malderberg e Witten nel 1962: le velocità degli atomi di idrogeno non era molto diversa nei due casi:
 $5 \div 9 \times 10^{-3}c$
- Olin et al., nel 1973 hanno usato la radiazione gamma emessa da nuclei di ^{20}Ne , usando la stessa configurazione sperimentale di Ives e Stilwell, con velocità di $1.2 \times 10^{-2}c$ o di $4.9 \times 10^{-2}c$

Altri esperimenti

- L'esperimento di Ives e Stilwell fu ripetuto con maggiore accuratezza da Malderberg e Witten nel 1962: le velocità degli atomi di idrogeno non era molto diversa nei due casi: $5 \div 9 \times 10^{-3}c$
- Olin et al., nel 1973 hanno usato la radiazione gamma emessa da nuclei di ^{20}Ne , usando la stessa configurazione sperimentale di Ives e Stilwell, con velocità di $1.2 \times 10^{-2}c$ o di $4.9 \times 10^{-2}c$
- L'accuratezza delle misure era del 3.5%.

Il laser entra in scena: 1970 circa

- L'uso del laser ha introdotto un cambio di strategia e ha portato l'accuratezza nella misura del fattore relativistico Γ , cioè della dilatazione del tempo, a valori dell'ordine di 10^{-9}

Il laser entra in scena: 1970 circa

- L'uso del laser ha introdotto un cambio di strategia e ha portato l'accuratezza nella misura del fattore relativistico Γ , cioè della dilatazione del tempo, a valori dell'ordine di 10^{-9}
- Invece della radiazione di emissione, si studia l'energia dei fotoni necessaria affinché gli atomi in volo li possano assorbire

Il laser entra in scena: 1970 circa

- L'uso del laser ha introdotto un cambio di strategia e ha portato l'accuratezza nella misura del fattore relativistico Γ , cioè della dilatazione del tempo, a valori dell'ordine di 10^{-9}
- Invece della radiazione di emissione, si studia l'energia dei fotoni necessaria affinché gli atomi in volo li possano assorbire
- Questa disposizione sperimentale si adatta molto bene all'uso della trattazione corpuscolare della luce

Il laser entra in scena: 1970 circa

- L'uso del laser ha introdotto un cambio di strategia e ha portato l'accuratezza nella misura del fattore relativistico Γ , cioè della dilatazione del tempo, a valori dell'ordine di 10^{-9}
- Invece della radiazione di emissione, si studia l'energia dei fotoni necessaria affinché gli atomi in volo li possano assorbire
- Questa disposizione sperimentale si adatta molto bene all'uso della trattazione corpuscolare della luce
- Le tecniche di misura variano dal semplice uso del laser per provocare l'assorbimento dei fotoni, a quello dell'assorbimento a due fotoni o all'uso della spettroscopia di saturazione

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

- $$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

$$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$



$$E_{ph}^P = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

$$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$



$$E_{ph}^P = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B}$$



$$E_{ph}^A = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II

$$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II

-
-

$$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$

$$\frac{E_{ph}^P + E_{ph}^A}{2} = \Gamma E_{ph}^0$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II



$$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$



$$\frac{E_{ph}^P + E_{ph}^A}{2} = \Gamma E_{ph}^0$$

- Quindi, misurando E_{ph}^P e E_{ph}^A , si ottengono il valore di E_0^{abs} e quello del fattore relativistico Γ .

Il laser entra in scena - II

- A partire dagli anni Ottanta del secolo scorso, si è diffusa la consuetudine di sottoporre a verifica sperimentale alcune predizioni della relatività speciale attraverso l'uso della 'teoria cinematica di prova' di Mansouri e Sexl (1977)

Il laser entra in scena - II

- A partire dagli anni Ottanta del secolo scorso, si è diffusa la consuetudine di sottoporre a verifica sperimentale alcune predizioni della relatività speciale attraverso l'uso della 'teoria cinematica di prova' di Mansouri e Sexl (1977)
- Questa teoria si basa sull'assunzione secondo cui la velocità di propagazione della luce è costante e isotropa solo in un ipotetico sistema di riferimento privilegiato ed usa trasformazioni di coordinate generalizzate che tengono conto anche della possibilità di differenti procedure di sincronizzazione degli orologi

Il laser entra in scena - II

- A partire dagli anni Ottanta del secolo scorso, si è diffusa la consuetudine di sottoporre a verifica sperimentale alcune predizioni della relatività speciale attraverso l'uso della 'teoria cinematica di prova' di Mansouri e Sexl (1977)
- Questa teoria si basa sull'assunzione secondo cui la velocità di propagazione della luce è costante e isotropa solo in un ipotetico sistema di riferimento privilegiato ed usa trasformazioni di coordinate generalizzate che tengono conto anche della possibilità di differenti procedure di sincronizzazione degli orologi
- La differenza tra le predizioni della relatività speciale e quelle della teoria di Mansouri e Sexl è riconducibile a tre parametri a , b e d che compaiono nelle trasformazioni di coordinate generalizzate e che dipendono dal quadrato della velocità del SRI rispetto al sistema di riferimento privilegiato

Il laser entra in scena - III

- Il parametro a controlla la dilatazione del tempo, b la contrazione delle lunghezze e il parametro d una contrazione delle lunghezze trasversale non prevista dalla relatività speciale: **nella relatività speciale, tutti e tre i parametri sono uguali ad uno**

Il laser entra in scena - III

- Il parametro a controlla la dilatazione del tempo, b la contrazione delle lunghezze e il parametro d una contrazione delle lunghezze trasversale non prevista dalla relatività speciale: **nella relatività speciale, tutti e tre i parametri sono uguali ad uno**
- Il parametro della dilatazione del tempo assume, nella teoria di prova di Mansouri e Sexl, la forma:

$$\gamma \approx \frac{1}{\sqrt{1 - v_i^2/c^2}} [1 + \alpha(v_i^2 + 2\vec{w} \cdot \vec{v}_i)] + \dots \quad (8)$$

dove \vec{w} è la velocità del sistema di riferimento del laboratorio rispetto al sistema di riferimento privilegiato e \vec{v}_i è, per esempio, la velocità della sorgente di luce rispetto al laboratorio.

- Quando, per esempio, si conclude che la dilatazione del tempo della relatività speciale è stata verificata con una accuratezza dell'ordine di 10^{-9} , ciò significa che il parametro α è, se diverso da zero, minore di 10^{-9} : questo risultato esclude anche – con la medesima accuratezza – la possibilità che il sistema di riferimento che vede la radiazione cosmica come isotropa possa costituire un sistema di riferimento privilegiato

- Quando, per esempio, si conclude che la dilatazione del tempo della relatività speciale è stata verificata con una accuratezza dell'ordine di 10^{-9} , ciò significa che il parametro α è, se diverso da zero, minore di 10^{-9} : questo risultato esclude anche – con la medesima accuratezza – la possibilità che il sistema di riferimento che vede la radiazione cosmica come isotropa possa costituire un sistema di riferimento privilegiato
- La teoria di Mansouri e Sexl può essere usata anche per descrivere esperimenti del tipo Michelson - Morley (in questo caso intervengono i parametri b e d) o esperimenti del tipo Kennedy - Thorndike (con l'intervento dei parametri a e b).

Vita media di particelle instabili. I

- La prima verifica sperimentale della dilatazione del tempo con particelle instabili è stata realizzata da Bruno Rossi e David Hall nel 1941

Vita media di particelle instabili. I

- La prima verifica sperimentale della dilatazione del tempo con particelle instabili è stata realizzata da Bruno Rossi e David Hall nel 1941
- Essi usarono i muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici

Vita media di particelle instabili. I

- La prima verifica sperimentale della dilatazione del tempo con particelle instabili è stata realizzata da Bruno Rossi e David Hall nel 1941
- Essi usarono i muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, comparvero diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori. Una rassegna dei dati ottenuti si può trovare nel lavoro di Bailey et al. (1977)

Vita media di particelle instabili. I

- La prima verifica sperimentale della dilatazione del tempo con particelle instabili è stata realizzata da Bruno Rossi e David Hall nel 1941
- Essi usarono i muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, comparvero diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori. Una rassegna dei dati ottenuti si può trovare nel lavoro di Bailey et al. (1977)
- In questi esperimenti, come in quello di Rossi e Hall, la vita media delle particelle in moto è misurata indirettamente attraverso la misura della loro velocità e della distanza media da loro percorsa: la differenza, essenziale ai fini dell'accuratezza della misura, consiste nel passaggio da misure in atmosfera a quelle in vuoto

Vita media di particelle instabili. I

- La prima verifica sperimentale della dilatazione del tempo con particelle instabili è stata realizzata da Bruno Rossi e David Hall nel 1941
- Essi usarono i muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, comparvero diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori. Una rassegna dei dati ottenuti si può trovare nel lavoro di Bailey et al. (1977)
- In questi esperimenti, come in quello di Rossi e Hall, la vita media delle particelle in moto è misurata indirettamente attraverso la misura della loro velocità e della distanza media da loro percorsa: la differenza, essenziale ai fini dell'accuratezza della misura, consiste nel passaggio da misure in atmosfera a quelle in vuoto
- Il lavoro di Bailey et al. è interessante anche perché studia il decadimento di muoni negativi o positivi in moto circolare uniforme [$a \approx 10^{18} g$]: il risultato è identico a quello che si sarebbe ottenuto se i muoni fossero stati in moto rettilineo uniforme

Vita media di particelle instabili. II

- Il decadimento di particelle instabili è descritto dall'equazione:

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (9)$$

dove τ è la vita media delle particelle.

Vita media di particelle instabili. II

- Il decadimento di particelle instabili è descritto dall'equazione:

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (9)$$

dove τ è la vita media delle particelle.

- Quindi, un insieme di particelle instabili o un materiale radioattivo può essere impiegato come un orologio: il suo standard di frequenza è l'inverso della vita media τ , il contatore è costituito dai rivelatori dei prodotti del decadimento

Vita media di particelle instabili. III

- Se particelle instabili sono in volo inerziale con velocità v rispetto al laboratorio, la distanza l percorsa è data da:

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (10)$$

dove τ_0 è la vita media delle particelle in quiete.

Vita media di particelle instabili. III

- Se particelle instabili sono in volo inerziale con velocità v rispetto al laboratorio, la distanza l percorsa è data da:

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (10)$$

dove τ_0 è la vita media delle particelle in quiete.

- Siccome questa equazione è sperimentalmente corroborata, ne segue che è corroborata la formula della dilatazione del tempo:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (11)$$

Vita media di particelle instabili. III

- Se particelle instabili sono in volo inerziale con velocità v rispetto al laboratorio, la distanza l percorsa è data da:

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (10)$$

dove τ_0 è la vita media delle particelle in quiete.

- Siccome questa equazione è sperimentalmente corroborata, ne segue che è corroborata la formula della dilatazione del tempo:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (11)$$

- L'accuratezza di queste misure è dell'ordine di 10^{-3}

Vita media di particelle instabili. III

- Se particelle instabili sono in volo inerziale con velocità v rispetto al laboratorio, la distanza l percorsa è data da:

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (10)$$

dove τ_0 è la vita media delle particelle in quiete.

- Siccome questa equazione è sperimentalmente corroborata, ne segue che è corroborata la formula della dilatazione del tempo:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (11)$$

- L'accuratezza di queste misure è dell'ordine di 10^{-3}
- Quindi, molto inferiore a quella delle misure sull'effetto Doppler [10^{-9}]

Paradosso degli orologi. I

- Due orologi *ideali* O_1 ed O_2 sono inizialmente in quiete nell'origine O di un SRI (quello del laboratorio). Ad un certo istante, O_2 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x e raggiunge la velocità V rispetto ad O_1 ; dopo aver viaggiato per un certo intervallo di tempo alla velocità V , decelera, si ferma nel punto B dell'asse x e ritorna verso O_1 con le medesime modalità e fasi del viaggio di andata (accelerazione, moto uniforme, decelerazione) ricongiungendosi alla fine con O_1 . \Rightarrow ERQ [pp. 37 - 40]

Paradosso degli orologi. I

- Due orologi *ideali* O_1 ed O_2 sono inizialmente in quiete nell'origine O di un SRI (quello del laboratorio). Ad un certo istante, O_2 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x e raggiunge la velocità V rispetto ad O_1 ; dopo aver viaggiato per un certo intervallo di tempo alla velocità V , decelera, si ferma nel punto B dell'asse x e ritorna verso O_1 con le medesime modalità e fasi del viaggio di andata (accelerazione, moto uniforme, decelerazione) ricongiungendosi alla fine con O_1 . \Rightarrow ERQ [pp. 37 - 40]
- O_1 prevede che, quando O_2 ritorna, esso mostrerà un numero inferiore a quello mostrato da O_1 . Tuttavia, *siccome il moto è relativo*, O_2 prevede che al ricongiungimento sia l'orologio O_1 a mostrare un numero inferiore. Da qui il paradosso.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso è dovuto alla seguente argomentazione fallace: *siccome* il moto è relativo [premessa], *allora* O_2 prevede che al ricongiungimento sia l'orologio O_1 a mostrare un numero inferiore [conclusione]. Dalla premessa, **non** segue la conclusione perché **i due orologi non sono equivalenti**.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso è dovuto alla seguente argomentazione fallace: *siccome* il moto è relativo [premessa], *allora* O_2 prevede che al ricongiungimento sia l'orologio O_1 a mostrare un numero inferiore [conclusione]. Dalla premessa, **non** segue la conclusione perché **i due orologi non sono equivalenti**.
- Infatti, mentre O_1 assiste solo a due eventi – O_1 incontra O_2 per la prima volta e O_1 incontra O_2 per la seconda volta – O_2 assiste a tre eventi: O_2 incontra O_1 per la prima volta; O_2 incontra B e, infine, O_2 incontra O_1 per la seconda volta. Quindi, c'è una asimmetria tra O_1 e O_2 dovuta al fatto che la serie di eventi osservati da O_1 e O_2 è diversa: se un viaggiatore vola da Roma a Parigi e ritorna, egli vede Roma, poi Parigi e di nuovo Roma: l'amico del viaggiatore che rimane a Roma, vede solo Roma.

Paradosso degli orologi. III

- Quindi, il paradosso nasce perché si considerano gli orologi O_1 ed O_2 come perfettamente equivalenti: che questa sia l'origine del paradosso è confermato dal fatto che tutti i tentativi di soluzione si basano sulla individuazione di una asimmetria tra i due orologi coinvolti.

Paradosso degli orologi. III

- Quindi, il paradosso nasce perché si considerano gli orologi O_1 ed O_2 come perfettamente equivalenti: che questa sia l'origine del paradosso è confermato dal fatto che tutti i tentativi di soluzione si basano sulla individuazione di una asimmetria tra i due orologi coinvolti.
- Prevalentemente, il paradosso è risolto nel modo seguente. I due orologi non sono equivalenti; infatti, uno solo di essi - nel nostro caso O_2 - subisce delle accelerazioni: quindi, l'orologio che al ricongiungimento mostra il numero inferiore è O_2 . Si aggiunge inoltre che, sebbene l'accelerazione permetta di distinguere tra i due orologi, l'effetto di dilatazione del tempo è dovuto solo alla velocità relativa nei tratti percorsi con moto uniforme.

Il paradosso del terzetto. I

- Consideriamo ora tre orologi nel SRI del laboratorio. Gli orologi O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine della coordinata x . Ad un certo istante, assunto uguale a zero per i tre orologi, gli orologi O_1 ed O_2 iniziano un moto, identico a quello dell'orologio del paradosso usuale, il primo lungo la direzione positiva dell'asse x , il secondo lungo la direzione negativa.

Il paradosso del terzetto. I

- Consideriamo ora tre orologi nel SRI del laboratorio. Gli orologi O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine della coordinata x . Ad un certo istante, assunto uguale a zero per i tre orologi, gli orologi O_1 ed O_2 iniziano un moto, identico a quello dell'orologio del paradosso usuale, il primo lungo la direzione positiva dell'asse x , il secondo lungo la direzione negativa.
- L'inversione del moto di O_1 avviene quando O_1 raggiunge il punto B_1 distante l_0 da O ; l'inversione del moto di O_2 avviene quando O_2 raggiunge il punto B_2 distante $-l_0$ da O . Questa configurazione è discussa in [Wortel et al.](#) ed è denominata 'paradosso del terzetto'.

Il paradosso del terzetto. II

- Vediamo come i fenomeni considerati sono descritti nel sistema di riferimento del laboratorio. La durata del viaggio di andata e ritorno di O_1 è uguale a $2l_0/V$; la durata del viaggio di andata e ritorno di O_2 è uguale a $2l_0/V$. Quindi, quando i due orologi si ricongiungono, essi sono ancora sincronizzati. Poniamoci ora dal punto di vista di O_1 . Per O_1 la durata del suo viaggio è $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$; analogamente, per O_2 la durata del suo viaggio è $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$. Quindi, quando O_1 ed O_2 si incontrano di nuovo, i loro due orologi mostrano lo stesso numero e sono pertanto ancora sincronizzati. Non è possibile enunciare alcun paradosso perché vi è perfetta simmetria tra i due orologi O_1 ed O_2 . I due orologi, quando ritornano in O sono ancora sincronizzati, non ostante il fatto che, durante il loro viaggio, la loro velocità relativa sia $\pm 2V/(1 + V^2/c^2)$.

Il paradosso del terzetto. II

- Vediamo come i fenomeni considerati sono descritti nel sistema di riferimento del laboratorio. La durata del viaggio di andata e ritorno di O_1 è uguale a $2l_0/V$; la durata del viaggio di andata e ritorno di O_2 è uguale a $2l_0/V$. Quindi, quando i due orologi si ricongiungono, essi sono ancora sincronizzati. Poniamoci ora dal punto di vista di O_1 . Per O_1 la durata del suo viaggio è $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$; analogamente, per O_2 la durata del suo viaggio è $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$. Quindi, quando O_1 ed O_2 si incontrano di nuovo, i loro due orologi mostrano lo stesso numero e sono pertanto ancora sincronizzati. Non è possibile enunciare alcun paradosso perché vi è perfetta simmetria tra i due orologi O_1 ed O_2 . I due orologi, quando ritornano in O sono ancora sincronizzati, non ostante il fatto che, durante il loro viaggio, la loro velocità relativa sia $\pm 2V/(1 + V^2/c^2)$.
- Tuttavia, la durata propria dei due viaggi, misurata da O_1 e O_2 è minore, rispetto a quella misurata dal laboratorio (O) di un fattore $\sqrt{1 - V^2/c^2}$.

Il paradosso del terzetto. III

- È possibile introdurre una interessante variante **asimmetrica** nel paradosso del terzetto (non trattata nel lavoro di Wortel et. al). Ora la distanza tra O e B_1 e la distanza tra O e B_2 (misurate nel SRI di O) sono connesse alle velocità di O_1 e O_2 dalla relazione $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$ in modo tale che la durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 sia la stessa nel sistema di riferimento di O . Invece, per O_1 e O_2 la durata propria del proprio viaggio sarà diversa: $\Delta t\sqrt{1 - V_1^2/c^2}$ per O_1 e $\Delta t\sqrt{1 - V_2^2/c^2}$ per O_2 . Al loro incontro i due orologi non saranno più sincronizzati, perché non vi è simmetria tra di essi.

Il paradosso del terzetto. III

- È possibile introdurre una interessante variante **asimmetrica** nel paradosso del terzetto (non trattata nel lavoro di Wortel et. al). Ora la distanza tra O e B_1 e la distanza tra O e B_2 (misurate nel SRI di O) sono connesse alle velocità di O_1 e O_2 dalla relazione $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$ in modo tale che la durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 sia la stessa nel sistema di riferimento di O . Invece, per O_1 e O_2 la durata propria del proprio viaggio sarà diversa: $\Delta t\sqrt{1 - V_1^2/c^2}$ per O_1 e $\Delta t\sqrt{1 - V_2^2/c^2}$ per O_2 . Al loro incontro i due orologi non saranno più sincronizzati, perché non vi è simmetria tra di essi.
- Questa versione asimmetrica del terzetto può essere considerata come la versione lineare dell'esperimento di Hafele e Keating in assenza di gravità.

Il paradosso del terzetto. IV

- In conclusione: il paradosso degli orologi nasce perché si presuppone che i due orologi considerati siano perfettamente simmetrici. Come abbiamo visto, questa supposta simmetria, in generale, non sussiste. Sarebbe quindi ragionevole non parlare più di 'paradosso degli orologi' ma di 'effetto viaggio'.

Il paradosso del terzetto. IV

- In conclusione: il paradosso degli orologi nasce perché si presuppone che i due orologi considerati siano perfettamente simmetrici. Come abbiamo visto, questa supposta simmetria, in generale, non sussiste. Sarebbe quindi ragionevole non parlare più di 'paradosso degli orologi' ma di 'effetto viaggio'.
- L'effetto viaggio è una conseguenza della dilatazione del tempo. Tuttavia, esso ha una proprietà che lo contraddistingue: mentre la dilatazione del tempo dipende solo dalla velocità relativa dei due orologi, l'effetto viaggio può dipendere anche da altri fattori.

Il paradosso del terzetto. IV

- In conclusione: il paradosso degli orologi nasce perché si presuppone che i due orologi considerati siano perfettamente simmetrici. Come abbiamo visto, questa supposta simmetria, in generale, non sussiste. Sarebbe quindi ragionevole non parlare più di 'paradosso degli orologi' ma di 'effetto viaggio'.
- L'effetto viaggio è una conseguenza della dilatazione del tempo. Tuttavia, esso ha una proprietà che lo contraddistingue: mentre la dilatazione del tempo dipende solo dalla velocità relativa dei due orologi, l'effetto viaggio può dipendere anche da altri fattori.
- Infatti, nel caso del terzetto asimmetrico il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}} \quad (12)$$

dove w è la velocità relativa tra i due orologi nel caso in cui i due orologi si stanno allontanando.

Il paradosso del terzetto. IV

- In conclusione: il paradosso degli orologi nasce perché si presuppone che i due orologi considerati siano perfettamente simmetrici. Come abbiamo visto, questa supposta simmetria, in generale, non sussiste. Sarebbe quindi ragionevole non parlare più di 'paradosso degli orologi' ma di 'effetto viaggio'.
- L'effetto viaggio è una conseguenza della dilatazione del tempo. Tuttavia, esso ha una proprietà che lo contraddistingue: mentre la dilatazione del tempo dipende solo dalla velocità relativa dei due orologi, l'effetto viaggio può dipendere anche da altri fattori.
- Infatti, nel caso del terzetto asimmetrico il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}} \quad (12)$$

dove w è la velocità relativa tra i due orologi nel caso in cui i due orologi si stanno allontanando.

- Questo rapporto è lo stesso che si trova nell'esperimento di Hafele e Keating, in assenza di gravità.

L'esperimento di Hafele e Keating. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto una determinata quota, percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza. Un secondo esperimento prevede invece che l'orologio sull'aereo circumnavighi la Terra verso Ovest. Nella descrizione teorica sono trascurati i tratti di ascesa e di discesa \Rightarrow ERQ [pp. 41 - 47].

L'esperimento di Hafele e Keating. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto una determinata quota, percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza. Un secondo esperimento prevede invece che l'orologio sull'aereo circumnavighi la Terra verso Ovest. Nella descrizione teorica sono trascurati i tratti di ascesa e di discesa \Rightarrow ERQ [pp. 41 - 47].
- Gli esperimenti sono descritti in un sistema di riferimento non rotante con l'origine nel centro della Terra, che è in caduta libera: quindi il sistema di riferimento scelto è un sistema inerziale. In questo sistema di riferimento entrambi gli orologi, quello posto in un punto dell'equatore e quello in volo sull'aereo, sono in moto e immersi nel campo gravitazionale terrestre supposto generato da una massa sferica.

L'esperimento di Hafele e Keating. II

- Hafele e Keating usano il formalismo della relatività generale.

L'esperimento di Hafele e Keating. II

- Hafele e Keating usano il formalismo della relatività generale.
- È tuttavia possibile pervenire agli stessi risultati usando la relatività speciale.

L'esperimento di Hafele e Keating. II

- Hafele e Keating usano il formalismo della relatività generale.
- È tuttavia possibile pervenire agli stessi risultati usando la relatività speciale.
- Infatti, la dipendenza di un orologio della classe EM dal potenziale gravitazionale si può ricavare all'interno della relatività speciale per campi gravitazionali deboli

L'esperimento di Hafele e Keating. II

- Hafele e Keating usano il formalismo della relatività generale.
- È tuttavia possibile pervenire agli stessi risultati usando la relatività speciale.
- Infatti, la dipendenza di un orologio della classe EM dal potenziale gravitazionale si può ricavare all'interno della relatività speciale per campi gravitazionali deboli
- Secondo Alley, “Il confronto con le predizioni sembrano mostrare un'incertezza di circa il 13% per la direzione Ovest, ma [un'incertezza] di gran lunga peggiore per la direzione Est.”

L'esperimento di Hafele e Keating. II

- Hafele e Keating usano il formalismo della relatività generale.
- È tuttavia possibile pervenire agli stessi risultati usando la relatività speciale.
- Infatti, la dipendenza di un orologio della classe EM dal potenziale gravitazionale si può ricavare all'interno della relatività speciale per campi gravitazionali deboli
- Secondo Alley, "Il confronto con le predizioni sembrano mostrare un'incertezza di circa il 13% per la direzione Ovest, ma [un'incertezza] di gran lunga peggiore per la direzione Est."
- In ogni caso, l'accuratezza di esperimenti di questo tipo non è paragonabile a quella che si ottiene con l'effetto Doppler di atomi o nuclei.

L'effetto della gravità sugli orologi. I

- Secondo la relatività generale, vale la relazione:

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} dt \quad (13)$$

Dove $d\tau$ è la durata del fenomeno che si è svolto nel punto P , mentre dt sarebbe stata la durata dello stesso fenomeno in assenza di campo gravitazionale ($g_{00} = 1$).

L'effetto della gravità sugli orologi. I

- Secondo la relatività generale, vale la relazione:

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} dt \quad (13)$$

Dove $d\tau$ è la durata del fenomeno che si è svolto nel punto P , mentre dt sarebbe stata la durata dello stesso fenomeno in assenza di campo gravitazionale ($g_{00} = 1$).

- La (13) implica che il periodo fondamentale di un orologio dipenda dal coefficiente metrico g_{00} secondo la relazione:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} \quad (14)$$

dove T_0 è il periodo fondamentale dello stesso orologio in assenza di gravità.

L'effetto della gravità sugli orologi. II

- Per campi gravitazionali statici e deboli si ha:

$$T_{grav} \approx \frac{T_0}{\sqrt{1 + 2\chi/c^2}} \approx T_0 \left(1 - \frac{\chi}{c^2}\right) > T_0 \quad (15)$$

dove $\chi = -GM/r$ è il **potenziale gravitazionale newtoniano** generato da una massa sferica

L'effetto della gravità sugli orologi. II

- Per campi gravitazionali statici e deboli si ha:

$$T_{grav} \approx \frac{T_0}{\sqrt{1 + 2\chi/c^2}} \approx T_0 \left(1 - \frac{\chi}{c^2}\right) > T_0 \quad (15)$$

dove $\chi = -GM/r$ è il **potenziale gravitazionale newtoniano** generato da una massa sferica

- Per la frequenza, vale la relazione

$$\nu_{grav} \approx \nu_0 \left(1 + \frac{\chi}{c^2}\right) < \nu_0 \quad (16)$$

L'effetto della gravità sugli orologi. II

- Per campi gravitazionali statici e deboli si ha:

$$T_{grav} \approx \frac{T_0}{\sqrt{1 + 2\chi/c^2}} \approx T_0 \left(1 - \frac{\chi}{c^2}\right) > T_0 \quad (15)$$

dove $\chi = -GM/r$ è il **potenziale gravitazionale newtoniano** generato da una massa sferica

- Per la frequenza, vale la relazione

$$\nu_{grav} \approx \nu_0 \left(1 + \frac{\chi}{c^2}\right) < \nu_0 \quad (16)$$

- Quindi, in relatività generale, non sussiste il concetto di orologio ideale, cioè di un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.

L'effetto della gravità sugli orologi. II

- Per campi gravitazionali statici e deboli si ha:

$$T_{grav} \approx \frac{T_0}{\sqrt{1 + 2\chi/c^2}} \approx T_0 \left(1 - \frac{\chi}{c^2}\right) > T_0 \quad (15)$$

dove $\chi = -GM/r$ è il **potenziale gravitazionale newtoniano** generato da una massa sferica

- Per la frequenza, vale la relazione

$$\nu_{grav} \approx \nu_0 \left(1 + \frac{\chi}{c^2}\right) < \nu_0 \quad (16)$$

- Quindi, in relatività generale, non sussiste il concetto di orologio ideale, cioè di un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.
- Non solo: è necessario assumere – a meno di non abbandonarsi alla ricerca, epistemologicamente insoddisfacente, di orologi che soddisfino la (14) – che la gravità modifica il periodo fondamentale di ogni classe di orologi secondo quanto previsto dalla (14).

L'effetto della gravità sugli orologi. III

- Nel 1960, **Pound e Rebka** verificarono sperimentalmente che l'energia dei fotoni emessi o assorbiti da nuclei dipende dal potenziale gravitazionale cui i nuclei sono sottoposti secondo l'equazione

$$E(R + h) \approx E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right) \quad (17)$$

dove R è il raggio della Terra, g l'accelerazione di gravità e h la distanza verticale dal suolo ($h \ll R$).

L'effetto della gravità sugli orologi. III

- Nel 1960, **Pound e Rebka** verificarono sperimentalmente che l'energia dei fotoni emessi o assorbiti da nuclei dipende dal potenziale gravitazionale cui i nuclei sono sottoposti secondo l'equazione

$$E(R + h) \approx E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right) \quad (17)$$

dove R è il raggio della Terra, g l'accelerazione di gravità e h la distanza verticale dal suolo ($h \ll R$).

- Questa equazione è un caso particolare della (16)

L'effetto della gravità sugli orologi. III

- Nel 1960, **Pound e Rebka** verificarono sperimentalmente che l'energia dei fotoni emessi o assorbiti da nuclei dipende dal potenziale gravitazionale cui i nuclei sono sottoposti secondo l'equazione

$$E(R + h) \approx E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right) \quad (17)$$

dove R è il raggio della Terra, g l'accelerazione di gravità e h la distanza verticale dal suolo ($h \ll R$).

- Questa equazione è un caso particolare della (16)
- Queste misure furono rese possibili dalla scoperta, avvenuta nel 1957, dell'effetto Mössbauer.

L'effetto della gravità sugli orologi. III

- Nel 1960, **Pound e Rebka** verificarono sperimentalmente che l'energia dei fotoni emessi o assorbiti da nuclei dipende dal potenziale gravitazionale cui i nuclei sono sottoposti secondo l'equazione

$$E(R + h) \approx E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right) \quad (17)$$

dove R è il raggio della Terra, g l'accelerazione di gravità e h la distanza verticale dal suolo ($h \ll R$).

- Questa equazione è un caso particolare della (16)
- Queste misure furono rese possibili dalla scoperta, avvenuta nel 1957, dell'effetto Mössbauer.
- Secondo l'effetto Mössbauer, nuclei radioattivi appartenenti ad un cristallo emettono una **frazione** dei fotoni gamma, **senza rinculo**.

L'effetto della gravità sugli orologi. IV

- Sebbene, nella pratica corrente, ci si riferisca indifferentemente a orologi o standard di frequenza, è opportuno mantenere la distinzione tra i due termini perché essi denotano oggetti fisici distinti.

L'effetto della gravità sugli orologi. IV

- Sebbene, nella pratica corrente, ci si riferisca indifferentemente a orologi o standard di frequenza, è opportuno mantenere la distinzione tra i due termini perché essi denotano oggetti fisici distinti.
- Gli esperimenti condotti sinora hanno dimostrato che soddisfano la (14) gli orologi della classe EM.

L'effetto della gravità sugli orologi. IV

- Sebbene, nella pratica corrente, ci si riferisca indifferentemente a orologi o standard di frequenza, è opportuno mantenere la distinzione tra i due termini perché essi denotano oggetti fisici distinti.
- Gli esperimenti condotti sinora hanno dimostrato che soddisfano la (14) gli orologi della classe EM.
- Ovviamente, gli orologi a pendolo non soddisfano la (14).

L'effetto della gravità sugli orologi. IV

- Sebbene, nella pratica corrente, ci si riferisca indifferentemente a orologi o standard di frequenza, è opportuno mantenere la distinzione tra i due termini perché essi denotano oggetti fisici distinti.
- Gli esperimenti condotti sinora hanno dimostrato che soddisfano la (14) gli orologi della classe EM.
- Ovviamente, gli orologi a pendolo non soddisfano la (14).
- L'accuratezza degli orologi a molla non permette la verifica della (14).

L'effetto della gravità sugli orologi. IV

- Sebbene, nella pratica corrente, ci si riferisca indifferentemente a orologi o standard di frequenza, è opportuno mantenere la distinzione tra i due termini perché essi denotano oggetti fisici distinti.
- Gli esperimenti condotti sinora hanno dimostrato che soddisfano la (14) gli orologi della classe EM.
- Ovviamente, gli orologi a pendolo non soddisfano la (14).
- L'accuratezza degli orologi a molla non permette la verifica della (14).
- Lo stesso discorso vale per eventuali orologi a particelle instabili: l'accuratezza delle misure della vita media dei muoni è dell'ordine di 10^{-6} ; l'accuratezza richiesta per misurare il termine χ/c^2 è invece dell'ordine di 10^{-12}

Energia da $E = mc^2$

- Come abbiamo visto, la formula $E = mc^2$ è corroborata dagli esperimenti sull'effetto Doppler per i fotoni e da quelli sull'effetto Compton.

Energia da $E = mc^2$

- Come abbiamo visto, la formula $E = mc^2$ è corroborata dagli esperimenti sull'effetto Doppler per i fotoni e da quelli sull'effetto Compton.
- Secondo la relatività speciale, valgono le seguenti formule:

Tipo di particella	Massa	Energia a riposo
Elementare	m	$E_0 = mc^2$
Composta	$M = \sum_i m_i + (U_{binding})/c^2$	$E_0 = \sum_i m_i c^2 + U_{binding}$

Tabella: Massa ed energia nella relatività speciale per particelle elementari o composte in quiete.

Energia da $E = mc^2$

- Come abbiamo visto, la formula $E = mc^2$ è corroborata dagli esperimenti sull'effetto Doppler per i fotoni e da quelli sull'effetto Compton.
- Secondo la relatività speciale, valgono le seguenti formule:

Tipo di particella	Massa	Energia a riposo
Elementare	m	$E_0 = mc^2$
Composta	$M = \sum_i m_i + (U_{binding})/c^2$	$E_0 = \sum_i m_i c^2 + U_{binding}$

Tabella: Massa ed energia nella relatività speciale per particelle elementari o composte in quiete.

- L'energia di legame $U_{binding}$ di una particella composta è **negativa**: il suo valore assoluto esprime l'energia necessaria per suddividere la particella composta nei suoi componenti non interagenti e in quiete

Energia da $E = mc^2$

- Come abbiamo visto, la formula $E = mc^2$ è corroborata dagli esperimenti sull'effetto Doppler per i fotoni e da quelli sull'effetto Compton.
- Secondo la relatività speciale, valgono le seguenti formule:

Tipo di particella	Massa	Energia a riposo
Elementare	m	$E_0 = mc^2$
Composta	$M = \sum_i m_i + (U_{binding})/c^2$	$E_0 = \sum_i m_i c^2 + U_{binding}$

Tabella: Massa ed energia nella relatività speciale per particelle elementari o composte in quiete.

- L'energia di legame $U_{binding}$ di una particella composta è **negativa**: il suo valore assoluto esprime l'energia necessaria per suddividere la particella composta nei suoi componenti non interagenti e in quiete
- Nei processi di fissione o di fusione è messa in gioco l'energia di legame $U_{binding}$, mentre le masse delle particelle elementari costituenti la particella composta non cambiano.

Energia da $E = mc^2$

- Come abbiamo visto, la formula $E = mc^2$ è corroborata dagli esperimenti sull'effetto Doppler per i fotoni e da quelli sull'effetto Compton.
- Secondo la relatività speciale, valgono le seguenti formule:

Tipo di particella	Massa	Energia a riposo
Elementare	m	$E_0 = mc^2$
Composta	$M = \sum_i m_i + (U_{binding})/c^2$	$E_0 = \sum_i m_i c^2 + U_{binding}$

Tabella: Massa ed energia nella relatività speciale per particelle elementari o composte in quiete.

- L'energia di legame $U_{binding}$ di una particella composta è **negativa**: il suo valore assoluto esprime l'energia necessaria per suddividere la particella composta nei suoi componenti non interagenti e in quiete
- Nei processi di fissione o di fusione è messa in gioco l'energia di legame $U_{binding}$, mentre le masse delle particelle elementari costituenti la particella composta non cambiano.
- Invece, nei processi di annichilazione, per esempio, elettrone - positrone, è messa in gioco la massa delle particelle elementari.

“Il concetto di positrone”

- Secondo **Hanson**, la storia della scoperta del positrone è stata – in realtà – la storia della scoperta di tre particelle: quella di Dirac, quella di Anderson e quella di Blackett - Occhialini.

“Il concetto di positrone”

- Secondo **Hanson**, la storia della scoperta del positrone è stata – in realtà – la storia della scoperta di tre particelle: quella di Dirac, quella di Anderson e quella di Blackett - Occhialini.
- Blackett e Occhialini hanno concluso che quelle di Dirac e Anderson erano la stessa particella da loro studiata.

“Il concetto di positrone”

- Secondo **Hanson**, la storia della scoperta del positrone è stata – in realtà – la storia della scoperta di tre particelle: quella di Dirac, quella di Anderson e quella di Blackett - Occhialini.
- Blackett e Occhialini hanno concluso che quelle di Dirac e Anderson erano la stessa particella da loro studiata.
- Tracce di cariche **negative che sembravano convergere verso la sorgente** da cui provenivano tracce di cariche negative erano state osservate da diversi ricercatori prima della scoperta del positrone

“Il concetto di positrone”

- Secondo **Hanson**, la storia della scoperta del positrone è stata – in realtà – la storia della scoperta di tre particelle: quella di Dirac, quella di Anderson e quella di Blackett - Occhialini.
- Blackett e Occhialini hanno concluso che quelle di Dirac e Anderson erano la stessa particella da loro studiata.
- Tracce di cariche **negative che sembravano convergere verso la sorgente** da cui provenivano tracce di cariche negative erano state osservate da diversi ricercatori prima della scoperta del positrone
- La predizione di Dirac sulla possibile esistenza del positrone, **non** ha ispirato le successive scoperte sperimentali

“Il concetto di positrone”

- Secondo **Hanson**, la storia della scoperta del positrone è stata – in realtà – la storia della scoperta di tre particelle: quella di Dirac, quella di Anderson e quella di Blackett - Occhialini.
- Blackett e Occhialini hanno concluso che quelle di Dirac e Anderson erano la stessa particella da loro studiata.
- Tracce di cariche **negative che sembravano convergere verso la sorgente** da cui provenivano tracce di cariche negative erano state osservate da diversi ricercatori prima della scoperta del positrone
- La predizione di Dirac sulla possibile esistenza del positrone, **non** ha ispirato le successive scoperte sperimentali
- La scoperta del positrone e quella della sua produzione/annichilazione è stato un processo complesso cui hanno contribuito diversi fisici: Carl Anderson; Patrick Blackett, Giuseppe Occhialini e James Chadwick; Frédéric Joliot e Irène Curie; Lise Meitner e Kurt Philipp.

Energia da $E = mc^2$. II

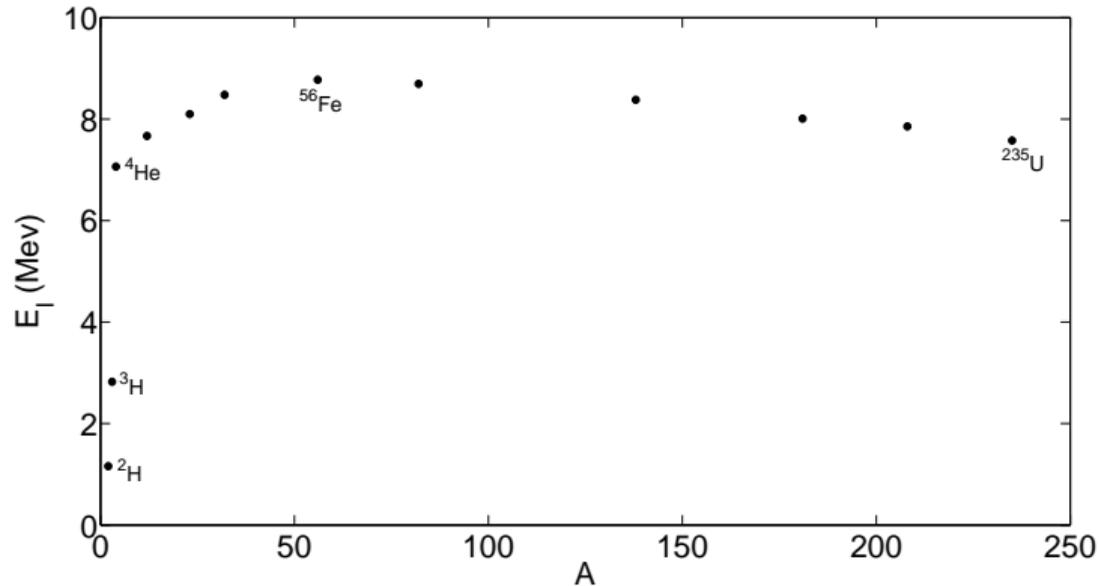


Figura: Energia media di legame per nucleone in funzione del numero di massa A (numero dei nucleoni).

- L'energia media di legame di un nucleone è data da:

$$E_l = - \frac{[M - (N_p m_p + N_n m_n)]}{N_p + N_n} c^2 \quad (18)$$

dove m_p è la massa del protone e m_n la massa del neutrone.

Energia da $E = mc^2$. III

- L'energia media di legame di un nucleone è data da:

$$E_l = -\frac{[M - (N_p m_p + N_n m_n)]}{N_p + N_n} c^2 \quad (18)$$

dove m_p è la massa del protone e m_n la massa del neutrone.

- L'energia liberata durante una reazione di fissione o fusione è allora:

$$E = N(E_l^f - E_l^i) \quad (19)$$

dove N è il numero dei nucleoni coinvolti nella reazione e E_l^i , E_l^f l'energia media di legame per nucleone iniziale e finale.

Energia dalla materia? I

- L'idea di estrarre energia dagli atomi ha percorso i primi decenni del Novecento come un rigagnolo carsico che, di tanto intanto, riaffiora e si espande in superficie grazie alla amplificazione della stampa

Energia dalla materia? I

- L'idea di estrarre energia dagli atomi ha percorso i primi decenni del Novecento come un rigagnolo carsico che, di tanto intanto, riaffiora e si espande in superficie grazie alla amplificazione della stampa
- "Le nostre biciclette possono essere illuminate con dischi di radio in minuscole lanterne? Queste sostanze possono diventare la forma di luce più economica per determinati scopi? Stiamo per realizzare il sogno chimerico degli alchimisti, lampade che illuminano perennemente senza consumo di olio?" [Henry Carrington Bolton, 1900]

Energia dalla materia? I

- L'idea di estrarre energia dagli atomi ha percorso i primi decenni del Novecento come un rigagnolo carsico che, di tanto intanto, riaffiora e si espande in superficie grazie alla amplificazione della stampa
- "Le nostre biciclette possono essere illuminate con dischi di radio in minuscole lanterne? Queste sostanze possono diventare la forma di luce più economica per determinati scopi? Stiamo per realizzare il sogno chimerico degli alchimisti, lampade che illuminano perennemente senza consumo di olio?" [Henry Carrington Bolton, 1900]
- La Terra è "un magazzino pieno di esplosivi, inconcepibilmente più potenti di qualsiasi altro che conosciamo, e forse solo in attesa di un detonatore adatto per far tornare la Terra nel caos" [Frederick Soddy, 1903]

Energia dalla materia? I

- L'idea di estrarre energia dagli atomi ha percorso i primi decenni del Novecento come un rigagnolo carsico che, di tanto intanto, riaffiora e si espande in superficie grazie alla amplificazione della stampa
- "Le nostre biciclette possono essere illuminate con dischi di radio in minuscole lanterne? Queste sostanze possono diventare la forma di luce più economica per determinati scopi? Stiamo per realizzare il sogno chimerico degli alchimisti, lampade che illuminano perennemente senza consumo di olio?" [Henry Carrington Bolton, 1900]
- La Terra è "un magazzino pieno di esplosivi, inconcepibilmente più potenti di qualsiasi altro che conosciamo, e forse solo in attesa di un detonatore adatto per far tornare la Terra nel caos" [Frederick Soddy, 1903]
- "Se fosse mai possibile controllare a piacimento il tasso di disintegrazione dei radioelementi, un'enorme quantità di energia potrebbe essere ottenuta da una piccola quantità di materia" [Ernest Rutherford, 1904]

Energia dalla materia? II

- La equivalenza tra massa ed energia (Einstein, 1905) non ha sostanzialmente modificato la situazione

Energia dalla materia? II

- La equivalenza tra massa ed energia (Einstein, 1905) non ha sostanzialmente modificato la situazione
- Lo stesso Einstein, scrivendo "Non è impossibile che la teoria possa essere verificata con corpi il cui contenuto energetico è altamente variabile (ad esempio con sali di radio) (1905)" in qualche modo ha contribuito a circoscrivere l'applicazione di $E = mc^2$ alle sostanze radioattive

Energia dalla materia? II

- La equivalenza tra massa ed energia (Einstein, 1905) non ha sostanzialmente modificato la situazione
- Lo stesso Einstein, scrivendo "Non è impossibile che la teoria possa essere verificata con corpi il cui contenuto energetico è altamente variabile (ad esempio con sali di radio) (1905)" in qualche modo ha contribuito a circoscrivere l'applicazione di $E = mc^2$ alle sostanze radioattive
- Secondo **Badash, Hodes e Tiddens**, "[Lodge] nel 1919 notò acutamente che tutta la materia, non solo le sostanze radioattive, contiene enormi quantità di energia, e ritenne che la società avrebbe tratto beneficio da una fonte di carburante senza ceneri, senza sporco e senza fumo"

Energia dalla materia? II

- La equivalenza tra massa ed energia (Einstein, 1905) non ha sostanzialmente modificato la situazione
- Lo stesso Einstein, scrivendo "Non è impossibile che la teoria possa essere verificata con corpi il cui contenuto energetico è altamente variabile (ad esempio con sali di radio) (1905)" in qualche modo ha contribuito a circoscrivere l'applicazione di $E = mc^2$ alle sostanze radioattive
- Secondo **Badash, Hodes e Tiddens**, "[Lodge] nel 1919 notò acutamente che tutta la materia, non solo le sostanze radioattive, contiene enormi quantità di energia, e ritenne che la società avrebbe tratto beneficio da una fonte di carburante senza ceneri, senza sporco e senza fumo"
- In ogni caso, furono solo le accurate misure di Francis William Aston delle masse degli atomi con lo spettrometro di massa a fornire un solido fondamento sperimentale al concetto di "difetto di massa", cioè dell'energia messa in gioco quando un nucleo è formato a partire dai suoi nucleoni costituenti.

La scoperta della fissione nucleare. I

- Le vicende che hanno portato alla scoperta della fissione nucleare possono essere comprese solo se si tiene conto del fatto che...

La scoperta della fissione nucleare. I

- Le vicende che hanno portato alla scoperta della fissione nucleare possono essere comprese solo se si tiene conto del fatto che...
- ...i fisici pensavano che un nucleo potesse emettere solo raggi γ o sue componenti, come, per esempio, particelle α ...

La scoperta della fissione nucleare. I

- Le vicende che hanno portato alla scoperta della fissione nucleare possono essere comprese solo se si tiene conto del fatto che...
- ...i fisici pensavano che un nucleo potesse emettere solo raggi γ o sue componenti, come, per esempio, particelle α ...
- ...Non era quindi neppure presa in considerazione la possibilità che un nucleo potesse scindersi

La scoperta della fissione nucleare. I

- Nel 1934, Fermi e collaboratori, bombardando U con neutroni lenti, pensò di avere prodotto elementi transuranici

La scoperta della fissione nucleare. I

- Nel 1934, Fermi e collaboratori, bombardando U con neutroni lenti, pensò di avere prodotto elementi transuranici
- La fissione nucleare fu successivamente riconosciuta e scoperta da Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner e Otto Frisch (1938)

La scoperta della fissione nucleare. I

- Nel 1934, Fermi e collaboratori, bombardando U con neutroni lenti, pensò di avere prodotto elementi transuranici
- La fissione nucleare fu successivamente riconosciuta e scoperta da Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner e Otto Frisch (1938)
- Il ruolo fondamentale svolto da Lise Meitner e Otto Frisch è stato oscurato e misconosciuto

La scoperta della fissione nucleare. I

- Nel 1934, Fermi e collaboratori, bombardando U con neutroni lenti, pensò di avere prodotto elementi transuranici
- La fissione nucleare fu successivamente riconosciuta e scoperta da Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner e Otto Frisch (1938)
- Il ruolo fondamentale svolto da Lise Meitner e Otto Frisch è stato oscurato e misconosciuto
- La scoperta della fissione immediatamente prima dello scoppio della seconda guerra mondiale ha dato origine a diverse ipotesi di storia controfattuale

Il ruolo di Lise Meitner. I

- Lise Meitner, che lavorava con Hahn e Streissman, nel luglio del 1938 fuggì da Berlino e raggiunse Stoccolma

Il ruolo di Lise Meitner. I

- Lise Meitner, che lavorava con Hahn e Streissman, nel luglio del 1938 fuggì da Berlino e raggiunse Stoccolma
- A Stoccolma, ospite nell'istituto diretto dal premio Nobel (1924) Manne Siegbahn, non ricevette un supporto adeguato per continuare gli esperimenti con efficacia e tempestività. Si dovette limitare a cercare di interpretare – con l'aiuto del nipote Otto Frisch allora a Copenhagen nell'istituto di Bohr – i risultati che Hahn e Streissmann stavano ottenendo a Berlino (le lettere tra Berlino e Stoccolma impiegavano due o tre giorni)

Il ruolo di Lise Meitner. I

- Lise Meitner, che lavorava con Hahn e Streissman, nel luglio del 1938 fuggì da Berlino e raggiunse Stoccolma
- A Stoccolma, ospite nell'istituto diretto dal premio Nobel (1924) Manne Siegbahn, non ricevette un supporto adeguato per continuare gli esperimenti con efficacia e tempestività. Si dovette limitare a cercare di interpretare – con l'aiuto del nipote Otto Frisch allora a Copenhagen nell'istituto di Bohr – i risultati che Hahn e Streissmann stavano ottenendo a Berlino (le lettere tra Berlino e Stoccolma impiegavano due o tre giorni)
- Nelle vacanze di Natale, Otto Frisch raggiunse la zia a Stoccolma e, probabilmente il 26 dicembre, fecero una gita sulla neve...

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]
- Fu questa la svolta fondamentale. Tuttavia le successive vicende politiche e militari – insieme a comportamenti individuali (Hahn, Siegbahn) – favorirono l’oscuramento dell’essenziale contributo di Meitner (e Frisch) alla scoperta della fissione

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]
- Fu questa la svolta fondamentale. Tuttavia le successive vicende politiche e militari – insieme a comportamenti individuali (Hahn, Siegbahn) – favorirono l’oscuramento dell’essenziale contributo di Meitner (e Frisch) alla scoperta della fissione
- Il risultato fu che nel 1944 il premio Nobel per la Chimica fu attribuito (segretamente) a Otto Hahn

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]
- Fu questa la svolta fondamentale. Tuttavia le successive vicende politiche e militari – insieme a comportamenti individuali (Hahn, Siegbahn) – favorirono l’oscuramento dell’essenziale contributo di Meitner (e Frisch) alla scoperta della fissione
- Il risultato fu che nel 1944 il premio Nobel per la Chimica fu attribuito (segretamente) a Otto Hahn
- La notizia del bombardamento di Hiroshima raggiunse Meitner nella cittadina Leksand: “Stordita, Lise corse all’aria aperta. Per cinque ore camminò per stradine e sentieri, boschi e campi, da sola. Più tardi, forse per cercare di calmarsi, registrò accuratamente il percorso fatto...” [Ruth Lewin Sime] ⇒ la biografia di [Lise Meitner](#)

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]
- Fu questa la svolta fondamentale. Tuttavia le successive vicende politiche e militari – insieme a comportamenti individuali (Hahn, Siegbahn) – favorirono l’oscuramento dell’essenziale contributo di Meitner (e Frisch) alla scoperta della fissione
- Il risultato fu che nel 1944 il premio Nobel per la Chimica fu attribuito (segretamente) a Otto Hahn
- La notizia del bombardamento di Hiroshima raggiunse Meitner nella cittadina Leksand: “Stordita, Lise corse all’aria aperta. Per cinque ore camminò per stradine e sentieri, boschi e campi, da sola. Più tardi, forse per cercare di calmarsi, registrò accuratamente il percorso fatto...” [Ruth Lewin Sime] ⇒ la biografia di [Lise Meitner](#)
- Il 25 gennaio 1946, Lise Meitner atterrò a NewYork

Il ruolo di Lise Meitner. II

- ... “A questo punto, [Lise ed io] ci sedemmo su un tronco d’albero e incominciammo a fare calcoli su un pezzo di carta. Trovammo che la carica del nucleo di Uranio era, in realtà, abbastanza grande per annullare quasi completamente l’effetto della tensione superficiale [modello a goccia del nucleo]. Pertanto, il nucleo di Uranio potrebbe essere piuttosto instabile e pronto a suddividersi alla minima provocazione (come l’impatto di un neutrone)” [Otto Robert Frisch, Memorie]
- Fu questa la svolta fondamentale. Tuttavia le successive vicende politiche e militari – insieme a comportamenti individuali (Hahn, Siegbahn) – favorirono l’oscuramento dell’essenziale contributo di Meitner (e Frisch) alla scoperta della fissione
- Il risultato fu che nel 1944 il premio Nobel per la Chimica fu attribuito (segretamente) a Otto Hahn
- La notizia del bombardamento di Hiroshima raggiunse Meitner nella cittadina Leksand: “Stordita, Lise corse all’aria aperta. Per cinque ore camminò per stradine e sentieri, boschi e campi, da sola. Più tardi, forse per cercare di calmarsi, registrò accuratamente il percorso fatto...” [Ruth Lewin Sime] ⇒ la biografia di [Lise Meitner](#)
- Il 25 gennaio 1946, Lise Meitner atterrò a NewYork
- Negli USA fu accolta con grande entusiasmo

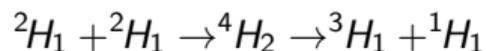
- Nel 1920, Arthur Eddington suggerisce che l'energia delle stelle proviene dalla fusione dell'idrogeno in elio.

Fusione nucleare

- Nel 1920, Arthur Eddington suggerisce che l'energia delle stelle proviene dalla fusione dell'idrogeno in elio.
- Nel 1934, Ernest Rutherford, Marcus Oliphant e Paul Harteck, bombardando deuterio con nuclei di deuterio, costituiti da un protone ed un neutrone, ottengono, per fusione, ${}^3\text{H}_1$, cioè Trizio secondo la reazione:

Fusione nucleare

- Nel 1920, Arthur Eddington suggerisce che l'energia delle stelle proviene dalla fusione dell'idrogeno in elio.
- Nel 1934, Ernest Rutherford, Marcus Oliphant e Paul Harteck, bombardando deuterio con nuclei di deuterio, costituiti da un protone ed un neutrone, ottengono, per fusione, ${}^3\text{H}_1$, cioè Trizio secondo la reazione:



- “Il principio universale della teoria della relatività ristretta è contenuto nel postulato: le leggi della fisica sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz (nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro, scelto arbitrariamente). Questo è un principio restrittivo delle leggi naturali, paragonabile al principio restrittivo della non - esistenza del perpetuum mobile, che sta alla base della termodinamica” [Einstein, Autobiografia Scientifica].

- “Il principio universale della teoria della relatività ristretta è contenuto nel postulato: le leggi della fisica sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz (nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro, scelto arbitrariamente). Questo è un principio restrittivo delle leggi naturali, paragonabile al principio restrittivo della non - esistenza del perpetuum mobile, che sta alla base della termodinamica” [Einstein, Autobiografia Scientifica].
- Qui, Einstein sottolinea la più generale delle caratteristiche teoriche ed epistemologiche della sua teoria.
- In realtà – come abbiamo visto – la relatività speciale contiene predizioni – o possibilità di predizioni – di fenomeni di vario tipo che sono poi state confermate dall’esperimento.

- “Il principio universale della teoria della relatività ristretta è contenuto nel postulato: le leggi della fisica sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz (nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro, scelto arbitrariamente). Questo è un principio restrittivo delle leggi naturali, paragonabile al principio restrittivo della non - esistenza del perpetuum mobile, che sta alla base della termodinamica” [Einstein, Autobiografia Scientifica].
- Qui, Einstein sottolinea la più generale delle caratteristiche teoriche ed epistemologiche della sua teoria.
- In realtà – come abbiamo visto – la relatività speciale contiene predizioni – o possibilità di predizioni – di fenomeni di vario tipo che sono poi state confermate dall’esperimento.
- Alcuni di questi fenomeni fanno oggi parte della tecnologia attuale.

- Dilatazione del tempo, effetto viaggio, red shift gravitazionale → Global Position System

- Dilatazione del tempo, effetto viaggio, red shift gravitazionale → Global Position System
- $E = Mc^2$ → Fissione e fusione nucleare

- Dilatazione del tempo, effetto viaggio, red shift gravitazionale → Global Position System
- $E = Mc^2$ → Fissione e fusione nucleare
- Annichilazione elettrone - positrone ($E = mc^2$) → PET (Positron - Emission - Tomography)

- Le due guerre mondiali hanno visto l'uso di nuove tecnologie derivate dalla fisica: la radiografia a raggi x nella prima guerra mondiale; i radar e le bombe nucleari nella seconda

Epilogo. III

- Le due guerre mondiali hanno visto l'uso di nuove tecnologie derivate dalla fisica: la radiografia a raggi x nella prima guerra mondiale; i radar e le bombe nucleari nella seconda
- Oggi scienza e tecnologia sono strettamente intrecciate e dipendono in larga misura dai finanziamenti statali

Epilogo. III

- Le due guerre mondiali hanno visto l'uso di nuove tecnologie derivate dalla fisica: la radiografia a raggi x nella prima guerra mondiale; i radar e le bombe nucleari nella seconda
- Oggi scienza e tecnologia sono strettamente intrecciate e dipendono in larga misura dai finanziamenti statali
- L'uso della tecnologia nella produzione beni strategici e di armi ha imposto limitazioni alla diffusione delle conoscenze, intaccando così uno dei fondamenti dell'impresa scientifica

Epilogo. III

- Le due guerre mondiali hanno visto l'uso di nuove tecnologie derivate dalla fisica: la radiografia a raggi x nella prima guerra mondiale; i radar e le bombe nucleari nella seconda
- Oggi scienza e tecnologia sono strettamente intrecciate e dipendono in larga misura dai finanziamenti statali
- L'uso della tecnologia nella produzione beni strategici e di armi ha imposto limitazioni alla diffusione delle conoscenze, intaccando così uno dei fondamenti dell'impresa scientifica
- Sugli scienziati ricadono responsabilità etiche e politiche, anche per quanto riguarda la divulgazione delle conoscenze scientifiche . . .

Epilogo. III

- Le due guerre mondiali hanno visto l'uso di nuove tecnologie derivate dalla fisica: la radiografia a raggi x nella prima guerra mondiale; i radar e le bombe nucleari nella seconda
- Oggi scienza e tecnologia sono strettamente intrecciate e dipendono in larga misura dai finanziamenti statali
- L'uso della tecnologia nella produzione beni strategici e di armi ha imposto limitazioni alla diffusione delle conoscenze, intaccando così uno dei fondamenti dell'impresa scientifica
- Sugli scienziati ricadono responsabilità etiche e politiche, anche per quanto riguarda la divulgazione delle conoscenze scientifiche . . .
- . . . la stagione dell'innocenza – se mai c'è stata – non è più qui.

French A P 1968 *Special Relativity* (Norton & Company; New York)

Ugarov V A 1979 *Special Theory of relativity* (MIR; Moscow)

Barone V 2004 *Relatività. Principi e applicazioni* (Torino; Boringhieri)

Giuliani G e Bonizzoni I 2004 *Lineamenti di elettromagnetismo* (Pavia; La Goliardica Pavese)

Will C M 2005 *Special Relativity: A Centenary Perspective* arXiv

Giuliani G 2019 *Elettromagnetismo, Relatività, Quanti - Fisica - Storia - Epistemologia* [citato in questo pdf come ERQ] (Pavia University Press; Pavia)

Grazie per l'attenzione!

Larghezza naturale di una riga

- A causa dell'esistenza della larghezza naturale di una riga, la differenza di energia tra due livelli atomici è rappresentata da una lorentziana:

$$L(\Delta E) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(\Delta E - \Delta E^{max})^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (20)$$

Larghezza naturale di una riga

- A causa dell'esistenza della larghezza naturale di una riga, la differenza di energia tra due livelli atomici è rappresentata da una lorentziana:

$$L(\Delta E) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(\Delta E - \Delta E^{max})^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (20)$$

- Il valore massimo si ha per $\Delta E = \Delta E^{max}$ ed è uguale a $2/(\pi\Gamma)$: Γ è la larghezza della funzione a metà altezza, cioè, per definizione, la larghezza della riga.

Larghezza naturale di una riga

- A causa dell'esistenza della larghezza naturale di una riga, la differenza di energia tra due livelli atomici è rappresentata da una lorentziana:

$$L(\Delta E) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma/2}{(\Delta E - \Delta E^{max})^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (20)$$

- Il valore massimo si ha per $\Delta E = \Delta E^{max}$ ed è uguale a $2/(\pi\Gamma)$: Γ è la larghezza della funzione a metà altezza, cioè, per definizione, la larghezza della riga.
- Si assume che la probabilità di emissione/assorbimento di un fotone sia proporzionale al corrispondente valore di ΔE dato dalla lorentziana

Allargamento Doppler di una riga

- L'allargamento Doppler di una riga è dato da:

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{Mc^2}} \quad (21)$$

dove k è la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta, M la massa dell'atomo e c la velocità della luce.

Allargamento Doppler di una riga

- L'allargamento Doppler di una riga è dato da:

$$\Delta\nu = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{Mc^2}} \quad (21)$$

dove k è la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta, M la massa dell'atomo e c la velocità della luce.

- Nel caso dell'atomo di idrogeno A 300 K $\Delta\nu \approx 5.6 \times 10^9$ Hz, se $\lambda_0 = 656.3$ nm.

La riga H_α dell'idrogeno

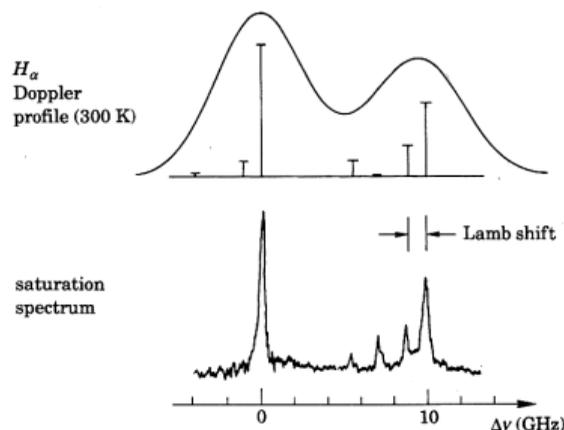


Figura: La parte superiore della figura mostra l'*apparente* doppietto della riga H_α ottenuto con metodi spettroscopici tradizionali. Le linee verticali indicano la posizione e l'intensità teoriche delle varie componenti. La parte inferiore della figura riproduce lo spettro sperimentale ottenuto con il metodo della *spettroscopia di saturazione*: siccome le condizioni sperimentali non assicurano che i livelli di partenza delle transizioni siano ugualmente popolati, non è possibile un confronto tra le intensità delle varie componenti previste teoricamente e quelle osservate. Figura tratta da: T.W. Hänsch, "Laser Spectroscopy in Atomic Hydrogen" in: *Frontiers in Laser Spectroscopy* - Proc. of the Inter. School of Physics "Enrico Fermi", 1994.

Spettroscopia di saturazione

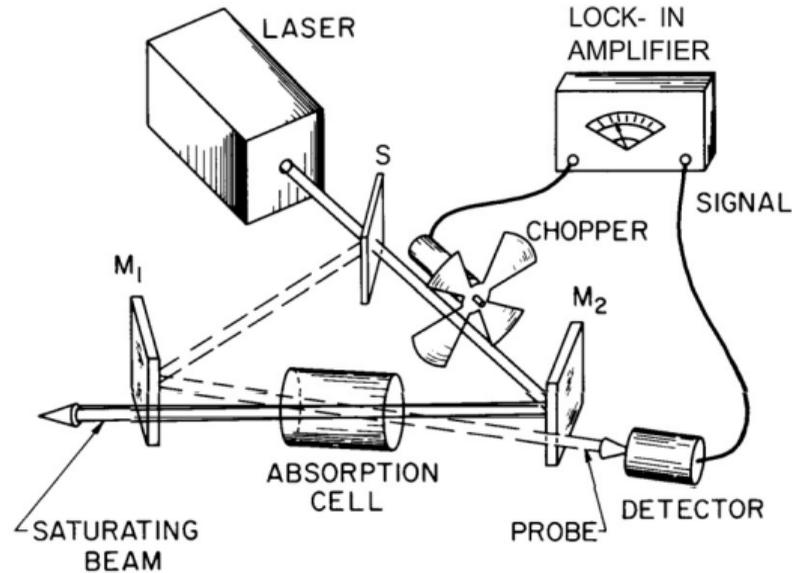


Figura: Schema di apparato per misure di *saturation spectroscopy*. Figura tratta da: A.L. Schawlow, Spectroscopy in a New Light, Nobel Lecture (1981).

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M(B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

- nulla se

$$v_1 = \frac{v_R}{2}$$

Laser Cooling

- La variazione dell'energia cinetica di un atomo dovuta all'assorbimento di un fotone in una collisione frontale è data da

$$\Delta E_{cin} = \Delta E_M (B_T - B_1); \quad B_T = \frac{\Delta E_M}{2mc^2}; \quad B_1 = \frac{v_1}{c}$$

- La variazione di energia cinetica dell'atomo è:
- negativa se

$$v_1 > \frac{v_R}{2} \quad v_R = \frac{\Delta E_M}{mc}$$

- nulla se

$$v_1 = \frac{v_R}{2}$$

- positiva se

$$v_1 < \frac{v_R}{2}$$

Energia potenziale

- Nella relatività speciale, il concetto di energia potenziale deve essere usato con cautela...

Energia potenziale

- Nella relatività speciale, il concetto di energia potenziale deve essere usato con cautela. . .
- . . . perché – a causa della velocità finita di propagazione delle interazioni – l'interazione tra due particelle all'istante t dipende dalla loro distanza ad un istante precedente

Energia potenziale

- Nella relatività speciale, il concetto di energia potenziale deve essere usato con cautela. . .
- . . . perché – a causa della velocità finita di propagazione delle interazioni – l'interazione tra due particelle all'istante t dipende dalla loro distanza ad un istante precedente
- Nel caso dell'interazione gravitazionale, la teoria di Newton assume implicitamente che la velocità di propagazione dell'interazione gravitazionale è infinita

Energia potenziale

- Nella relatività speciale, il concetto di energia potenziale deve essere usato con cautela. . .
- . . . perché – a causa della velocità finita di propagazione delle interazioni – l'interazione tra due particelle all'istante t dipende dalla loro distanza ad un istante precedente
- Nel caso dell'interazione gravitazionale, la teoria di Newton assume implicitamente che la velocità di propagazione dell'interazione gravitazionale è infinita
- Nella teoria della gravitazione di Einstein, il concetto di energia potenziale non è utilizzato

Energia potenziale

- Nella relatività speciale, il concetto di energia potenziale deve essere usato con cautela. . .
- . . . perché – a causa della velocità finita di propagazione delle interazioni – l'interazione tra due particelle all'istante t dipende dalla loro distanza ad un istante precedente
- Nel caso dell'interazione gravitazionale, la teoria di Newton assume implicitamente che la velocità di propagazione dell'interazione gravitazionale è infinita
- Nella teoria della gravitazione di Einstein, il concetto di energia potenziale non è utilizzato
- Tuttavia – per campi gravitazionali statici e deboli e velocità piccole rispetto a quella della luce – si può usare l'approssimazione newtoniana e, quindi, anche il concetto di potenziale gravitazionale

Sistema rotante. I

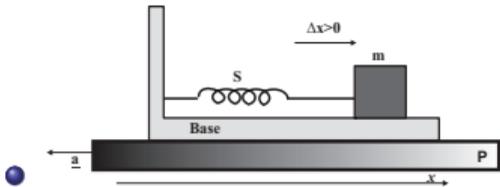


Figura: schema dell'accelerometro.

Sistema rotante. I

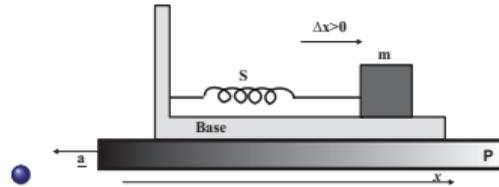


Figura: schema dell'accelerometro.

$$\Delta x = -\frac{m}{k} a$$

Sistema rotante. I

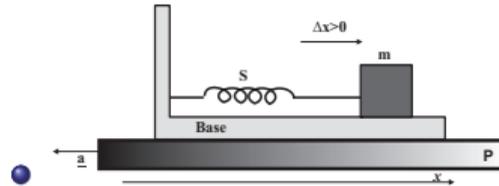


Figura: schema dell'accelerometro.

•

$$\Delta x = -\frac{m}{k} a$$

- L'allungamento/compressione della molla Δx avviene in direzione **opposta** a quella dell'accelerazione

Sistema rotante. I

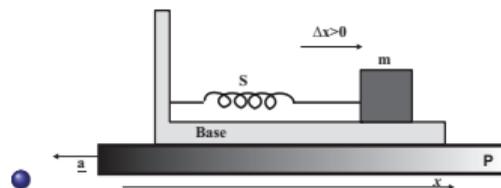


Figura: schema dell'accelerometro.

•

$$\Delta x = -\frac{m}{k} a$$

- L'allungamento/compressione della molla Δx avviene in direzione **opposta** a quella dell'accelerazione
- I diversi tipi di accelerometro si differenziano in base al sensore utilizzato per misurare Δx o la forza esercitata dalla molla
- Un accelerometro disposto verticalmente (equivalente ad una rotazione della figura di $\pi/2$ in senso orario) in un punto dell'equatore mostra un'accelerazione diretta verso l'alto. Il valore assoluto di questa accelerazione è dato da $a = g - a_c$, dove g è l'accelerazione di gravità e a_c l'accelerazione centrifuga

Sistema rotante. II

- Nel caso di particelle instabili rotanti su una circonferenza, abbiamo, nel SRI del laboratorio:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \Omega^2 r^2 / c^2}}$$

Sistema rotante. II

- Nel caso di particelle instabili rotanti su una circonferenza, abbiamo, nel SRI del laboratorio:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \Omega^2 r^2 / c^2}}$$

- Nel sistema di riferimento co-rotante con la particella, questa formula può essere riscritta così:

$$\tau_0 = \tau \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 r^2}{c^2}} = \tau \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

Sistema rotante. II

- Nel caso di particelle instabili rotanti su una circonferenza, abbiamo, nel SRI del laboratorio:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \Omega^2 r^2 / c^2}}$$

- Nel sistema di riferimento co-rotante con la particella, questa formula può essere riscritta così:

$$\tau_0 = \tau \sqrt{1 - \frac{\Omega^2 r^2}{c^2}} = \tau \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

- Che è interpretata come la variazione della vita media delle particelle dovuta al campo pseudo-gravitazionale

$$\chi = -\frac{\Omega^2 r^2}{2}$$

Sistema rotante. III

Einstein commenta il risultato ottenuto così:

“Questo risultato è corretto anche dal punto di vista di un osservatore che ruota con il disco. Perché, dal punto di vista del disco, compare un campo gravitazionale di potenziale χ , il risultato che abbiamo ottenuto sarà valido in generale per i campi gravitazionali. Inoltre, possiamo considerare un atomo che emette linee spettrali come un orologio; quindi sarà valida la seguente affermazione *la frequenza della luce assorbita o emessa da un atomo dipende dal campo gravitazionale in cui l'atomo si trova*”. *Relativity: the special and the general theory* (1920) (New York; Henry Holt & Company) p. 157.