

La fisica di Feynmann

Fisica moderna

6.1 RELATIVITÀ

6.1.1 Meccanica relativistica

Spazio-tempo

Evento

punto (x, y, z, t) dello spazio-tempo

Trasformazioni di Lorentz

relazioni tra il sistema (x, y, z, t) in quiete e il sistema (x', y', z', t') che si muove in direzione x a velocità u :

$$\begin{cases} x' = (x - u t) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = (t - u x / c^2) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \end{cases}$$

(nascono per rendere le equazioni di Maxwell obbedienti al principio della relatività)

Intervallo

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = \text{costante}$$

un intervallo è invariante (rimane costante anche dopo una trasformazione)

Velocità relativistica

$$v_x = (u + v_x') / (1 + u v_x' / c^2)$$

quindi la luce ha la stessa velocità per qualunque osservatore

Dinamica relativistica

Massa relativistica

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

m_0 = massa a riposo

Quantità di moto

$$\mathbf{p} = m \mathbf{v} = m_0 \mathbf{v} / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

la quantità di moto si conserva

Forza

$$\mathbf{F} = d(m \mathbf{v})/dt$$

Energia e massa

$$E = m c^2$$

Energia a riposo

$$E = m_0 c^2$$

(Relazioni tra v , p , E)

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

$$p c = E v / c$$

QUADRIVETTORE QUANTITÀ DI MOTO

Quantità di moto quadrivettoriale

$$(p_x, p_y, p_z, E)$$

la quantità di moto quadrivettoriale si conserva

Trasformazioni

$$\begin{cases} p_x' = (p_x - u E) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \\ p_y' = p_y \\ p_z' = p_z \\ E' = (E - u p_x / c^2) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \end{cases}$$

6.1.2 Radiazione relativistica

Sorgente di radiazioni relativistica

Campo elettrico relativistico

data una sorgente in movimento molto lontana dall'osservatore (posto in direzione z), si ha:

$$E_x = - [q / (4 \pi \epsilon_0 c^2 R_0)] d^2x'/dt^2$$

$$E_y = - [q / (4 \pi \epsilon_0 c^2 R_0)] d^2y'/dt^2 \quad R_0 = \text{distanza}$$

al tempo t_1 q ha la posizione $x(t_1)$, $y(t_1)$, $z(t_1)$

il tempo ritardato è: $t = t_1 + R_0 / c + z(t_1) / c$

vale: $x'(t) = x(t_1)$, $y'(t) = y(t_1)$

quindi il moto di un campo elettrico di una carica in movimento è la curva delle posizioni x' , y' in funzione di t ; l'accelerazione della curva dà il campo elettrico in funzione di t (se il moto è lento la curva è un'onda sinusoidale, se è ad alta velocità l'onda segue l'ipocicloide; se la velocità è prossima a c , ci sono cuspidi con un grande impulso distanziate dal tempo $1/T_0$)

Radiazione di sincrotrone

se elettroni molto veloci si muovono su orbite circolari in un campo magnetico uniforme emettono una radiazione elettromagnetica detta di sincrotrone; la luce emessa è polarizzata

$$p = q B R, \quad \omega = q v B / p$$

$R =$ raggio, $\omega =$ velocità angolare

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$$E \text{ (in elettron-volt)} \cong p c = 3 \cdot 10^8 (q/q_e) B R$$

Radiazione di frenamento

se elettroni molto energetici si muovono attraverso la materia, "sputano" avanti radiazione

Effetto Doppler

spostamento di frequenza osservato rispetto alla frequenza naturale ω_0

1. quando una sorgente si muove verso l'osservatore:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} / (1 - v/c)$$

2. quando un osservatore si muove verso una sorgente:

$$\omega = \omega_0 (1 + v/c) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

le due frequenze sono le stesse, poiché il tempo subisce una dilatazione

$$\omega' = (\omega_0 + k v) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$k' = (k + \omega v / c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

PROPAGAZIONE DELLA LUCE NELLO SPAZIO

Formula dell'onda

se la direzione non corrisponde ad un asse, vale: $\cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$

Vettore d'onda

$$\mathbf{k} = k \mathbf{e}_k$$

Quadrivettore ω, k

la componente k_x è la rapidità di variazione della fase rispetto a x (ω, k_x, k_y, k_z)

si trasforma come (t, x, y, z) e la quantità $\omega t - k_x x - k_y y - k_z z$ è invariante

Aberrazione

se \mathbf{k} non è in direzione del moto dell'osservatore è in moto, la luce sembra giungere dalla direzione $\sin \vartheta = v / c$

Pressione di radiazione della luce

quando un campo elettrico agisce su una carica, su di essa agisce anche il campo magnetico sviluppando la forza $F = B v q$ nella direzione di propagazione della luce (detta pressione di radiazione)

$$\langle F \rangle = (dW/dt) / c$$

Quantità di moto della luce

$p = E / c$ (rivolta nella direzione di propagazione della luce)

Relazioni di De Broglie

$\mathbf{W} = \hbar \boldsymbol{\omega}$; $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$ (valide per i fotoni)

6.1.2 Elettrodinamica relativistica

Carica relativistica

Densità di carica

data una distribuzione di cariche, la densità di carica varia come la massa relativistica:

$$\rho = \rho_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

QUADRIVETTORE DENSITA' DI CORRENTE E CARICA

Quadrivettore \mathbf{j}

(j_x, j_y, j_z, ρ)

il * quadrivettoriale si conserva

Trasformazioni

$$\begin{cases} j_x' = (j_x - u \rho) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \\ j_y' = j_y \\ j_z' = j_z \\ \rho' = (\rho - u j_x / c^2) / \sqrt{1 - u^2/c^2} \end{cases}$$

6.2 STRUTTURA DELLA MATERIA

Le particelle fondamentali

Fotone

$v = c / \lambda \Rightarrow E = p c$ (quindi il fotone ha massa a riposo m_0 nulla e non si ferma mai - va sempre a velocità c)

L'atomo

Energia di un atomo

$$E = h^2 / (2 m a^2) - e^2 / a$$

Raggio di Bohr

$$a_0 = h^2 / (m e^2)$$

Energia di ionizzazione dell'idrogeno

$$E_0 = -e^2 / (2 a_0^2)$$

Principio di combinazione di Ritz

se troviamo due righe spettrali, ci aspettiamo di trovarne un'altra in corrispondenza della somma o della differenza delle frequenze

$$\omega_{20} = \omega_{21} + \omega_{10}$$

6.3 MECCANICA QUANTISTICA

Principi

Principi della meccanica quantistica

dato un esperimento ideale:

1. la probabilità di un evento è dato dal quadrato del valore assoluto di un numero complesso ϕ detto ampiezza di probabilità

$$P = |\psi|^2$$
2. quando un evento può manifestarsi in modi alternativi, l'ampiezza di probabilità è la somma delle ampiezze di probabilità separate, e vi è interferenza.

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 ; P = |\psi_1 + \psi_2|^2$$

3. se si determina quale alternativa si prende, la probabilità è data dalla somma delle probabilità separate, e non vi è interferenza.

$$P = P_1 + P_2$$

Principio di indeterminazione di Heisenberg

se si determina la componente della quantità di moto con una indeterminazione Δp , non è possibile allo stesso tempo conoscere la posizione con un'indeterminazione minore di $\Delta x = h / \Delta p$.

Dualismo particella-onda

Forze

nella meccanica quantistica il concetto di forza svanisce, hanno importanza l'energia e la quantità di moto che determinano le fasi delle funzioni d'onda

Quantità di moto

$$p = h / \lambda = \hbar k \quad (k = \text{numero d'onda})$$

Energia

$$E = h \nu = \hbar \omega \quad (\omega = \text{frequenza})$$

Effetto Doppler

dopo una trasformazione cambia l'energia e quindi anche la frequenza

Ampiezza di probabilità di una particella

$$\psi = A e^{i(\omega t - kx)}$$

$|\psi|^2$ dà la probabilità relativa di trovare la particella in funzione della posizione e del tempo

$$\hbar^2 \omega^2 / c^2 - \hbar^2 k^2 = m^2 c^2$$

Equazione della dispersione

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2 + \partial^2 \psi / \partial z^2 - (1/c^2) (\partial^2 \psi / \partial t^2) = (m^2 c^2 / \hbar^2) \psi$$

Radiazioni

Radiazione di corpo nero

un oscillatore armonico può acquistare energia solo in quantità $\hbar \omega$ l'energia media non è $k T$ ma è: $\langle E \rangle = \hbar \omega / (e^{\hbar \omega / kT} - 1)$

la distribuzione della luce nella scatola è data dalla formula di Planck:

$$I(\omega) d\omega = \hbar \omega^3 d\omega / \pi^2 c^2 (e^{\hbar \omega / kT} - 1)$$

Legge della radiazione di Einstein

esistono tre tipi di processi:

- assorbimento proporzionale all'intensità della luce (B_{nm})
- emissione indotta proporzionale all'intensità della luce (B_{mn})
- emissione spontanea indipendente dalla luce (A_{mn})

$$I(\omega) = A_{mn} / (B_{nm} e^{\hbar \omega / kT} - B_{mn})$$

vale: $B_{nm} = B_{mn}$ (la probabilità di emissione indotta e assorbimento sono uguali), $A_{mn} / B_{mn} = \hbar \omega^3 / \pi^2 c^2$ (conoscendo la probabilità di assorbimento possiamo trovare la probabilità di emissione spontanea e indotta)

Laser

dato un gas in cui il numero di atomi nello stato superiore è molto grande e nello stato inferiore è nullo, la luce con frequenza $E_{sup} - E_{inf}$ non solo viene assorbita, ma induce l'emissione dello stato superiore e l'intero complesso (detto LASER, MASER nell'infrarosso) scarica contemporaneamente