

TEXT HISTÒRIC:

De l'equivalència i convertibilitat entre la massa i l'energia: la massa-energia

($\Delta m = E_0/c^2$, on c^2 és el factor de conversió entre E_0 - energia que absorbeix o emet una partícula- i la variació de massa que experimenta)

Ens ho explica de primera mà el mateix Einstein i en català (tot un plaer!).

El desembre de 1916, Einstein completava la redacció del llibre del qual en transcriurem un fragment, la "Teoria de la relativitat especial i general (a l'abast de tothom)". L'obra, que ha esdevingut un clàssic de la literatura científica del segle XX, segueix oferint una excel·lent introducció a la teoria de la relativitat i en ella Einstein es proclamà un gran divulgador científic.

*Einstein, Albert (1916). **Resultats generals de la teoria.** Secció 15 de la part I (*) del llibre "Teoria de la relativitat especial i general (a l'abast de tothom)". Traducció de Xavier Roqué.*

() Resultats generals de la teoria de la relativitat especial*

"Les consideracions precedents deixen clar que la teoria de la relativitat (especial) ha sorgit de l'electrodinàmica i de l'òptica. La teoria gairebé no ha modificat els resultats teòrics d'aquestes disciplines, però n'ha simplificat notablement l'edifici teòric, és a dir, la deducció de les lleis, i -el que és molt més important- ha reduït el nombre d'hipòtesis mútuament independents sobre les quals descansa la teoria. Ha conferit a la teoria de Maxwell-Lorentz un grau d'evidència tan gran, que aquesta s'hauria imposat als físics fins i tot si els experiments s'hi haguessin pronunciat a favor de forma menys convincent.

La mecànica clàssica només necessitava una modificació per tal de satisfer el requisit de la teoria especial de la relativitat. Aquesta modificació tan sols afecta essencialment les lleis de moviment ràpids, en què les velocitats v de la matèria no són prou petites. L'experiència ens mostra que només electrons i ions es mouen tan ràpidament, i que per a d'altres moviments les desviacions respecte a les lleis de la mecànica clàssica són massa petites per ser apreciades en la pràctica. Del moviment dels astres ja en parlarem a propòsit de la relativitat general. Segons la teoria de la relativitat, l'energia cinètica d'un punt material de massa m no ve donada per la coneguda expressió

$$m \cdot \frac{v^2}{2}$$

sinó per aquesta altra

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Aquesta expressió tendeix a infinit quan la velocitat v s'apropa a la de la llum. La velocitat serà sempre menor que c , per més energia que s'esmerci en l'acceleració. Desenvolupant en sèrie l'expressió de l'energia cinètica tenim

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

En la mecànica clàssica, el tercer d'aquests termes és sempre petit respecte del segon, si v^2/c^2 és petit respecte d'1. El primer terme, mc^2 , no inclou la velocitat i no cal que el considerem si del que es tracta és de veure com depèn de la velocitat l'energia d'una massa puntual. Més endavant parlarem del seu significat essencial.

El resultat general més important al qual ha conduït la teoria especial de la relativitat afecta el concepte de massa. La física prerelativista coneixia dos principis de conservació fonamentals, el principi de conservació de l'energia i el principi de conservació de la massa, que semblaven completament independents l'un de l'altre. La teoria de la relativitat els ha fos en un de sol. Exposarem breument com ha estat això i com s'ha d'interpretar aquesta fusió.

El principi de relativitat requereix la validesa del principi de conservació de l'energia no només respecte d'un sistema de coordenades K , sinó respecte de qualsevol sistema de coordenades K' que es trobi en moviment de translació uniforme respecte de K (breu, respecte de qualsevol sistema de coordenades *galileà*). A diferència de la mecànica clàssica, la transició entre dos d'aquests sistemes ve donada per la transformació de Lorentz.

A partir d'aquestes premisses i de les equacions fonamentals de l'electrodinàmica de Maxwell-Lorentz, concloem necessàriament, a través de consideracions relativament senzilles, que un cos que es mou amb velocitat v i que absorbeix l'energia E_0 en forma de radiació*¹ sense variar la seva velocitat, veu augmentar la seva energia en la quantitat:

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Atenent a l'expressió anterior per l'energia cinètica, l'energia del cos ve donada per:

$$\frac{\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right)c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

El cos té, doncs, la mateixa energia que un cos de massa $\left(m + \frac{E_0}{c^2}\right)$ movent-se amb velocitat v . Es pot dir que si un cos absorbeix l'energia E_0 , la seva massa inercial augmenta en $\frac{E_0}{c^2}$; la massa inercial d'un cos no és cap constant, sinó que varia amb l'energia. Podem considerar la massa inercial d'un sistema de varis cossos com una mesura de la seva energia. El principi de conservació de la massa d'un sistema coincideix amb el principi de conservació de l'energia, i només val en la mesura que el sistema no absorbeix ni emet energia. Escrivint l'expressió de l'energia cinètica en la forma

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

veiem que la forma mc^2 , que ja ens havia cridat l'atenció, no és sinó l'energia que posseïa el cos^{*2} abans d'absorbir l'energia E_0 .

Fins ara no s'ha pogut contrastar directament aquest principi amb l'experiència, ja que les variacions d'energia E_0 que podem imprimir a un sistema no són prou grans per causar canvis apreciables en la seva massa inercial. $\frac{E_0}{c^2}$ és massa petit en comparació amb la massa m present abans de la variació d'energia. Aquesta circumstància explica que es pogués establir amb èxit un principi de conservació de la massa vàlid en ell mateix.

Encara una darrera observació essencial. L'èxit de la interpretació de Faraday-Maxwell de l'acció a distància electromagnètica a través de processos intermedis que es propaguen amb velocitat finita, va fer que s'obrís pas entre els físics la convicció que no hi havia accions a distància instantànies i immediates, del tipus de la llei de la gravitació de Newton. En la teoria de la relativitat, en lloc de l'acció a distància immediata o l'acció a distància amb velocitat de transmissió infinita, apareix sempre l'acció a distància amb la velocitat de la llum. Això està relacionat amb el paper essencial que té la velocitat de la llum en aquesta teoria. A la segona part veurem de quina manera es veu modificat aquest resultat per la teoria de la relativitat general.

*1 E_0 és l'energia absorbida, considerada des d'un sistema de coordenades que es mou amb el cos.

*2 Considerat des d'un sistema de coordenades que participa del seu moviment.

FONT:

Roqué, Xavier.(2000). Albert Einstein. La teoria de la relativitat i altres textos. Col·lecció Clàssics de la Ciència. núm.4. Barcelona. Vic. Institut d'Estudis Catalans/Editorial Pòrtic/Eumo Editorial. (pp.26-29).

NOTA IMPORTANT: en la notació que utilitzem m equivaldria a m_0 ; ($\Delta m = E_0/c^2$)

QÜESTIONS:

1.- Quin valor essencial des del punt de vista del mètode científic atorga Einstein a la seva teoria de la relativitat especial?

PISTA: Observa que aquest “valor” reforça la confiança de l'autor en la certesa de la teoria amb independència de l'existència de proves experimentals.

2.- Quan cal -en quines condicions- modificar la mecànica clàssica per tal de satisfer els postulats de la relativitat especial o restringida?

3.- Quina és la conseqüència més important –i sorprenent!- de la teoria de la relativitat restringida?

Existien proves experimentals en el moment d'escriure el text?

Posa exemples d'aquestes proves experimentals.

4.- Què és la massa inercial d'un cos? De quina manera depèn aquesta de la velocitat del cos?

5.- Atenent a la comparació entre la velocitat de la partícula v i c , fes una anàlisi dels diferents casos possibles de relació entre $m(v)$ i m_0 .

6.- Argumenta en termes energètics o dinàmics per què no podem accelerar un cos fins a assolir la velocitat llimdar de la natura c .

7.- Observa que Einstein només parla d'electrons i ions que es mouen a velocitats “ràpides”. Podríem ampliar actualment el nombre d'exemples?

8.- A quina física s'està referint Einstein amb l'expressió prerelativista?

9.- Quins dos principis de conservació independents per a la física prerelativista s'unifiquen en un de sol en la teoria de la relativitat especial?

Concreta quin dels dos principis inclou a quin.

10.- Com és que s'havien pogut formular amb èxit de manera independent?

Especifica quin dels dos principis de conservació fou formulat el 1789 per l'avui considerat pare de la química moderna. Qui era aquest personatge?

11.- Quin és el significat essencial, que ja ens hauria d'haver cridat l'atenció, del terme “ $m \cdot c^2$ ”? (o $m_0 \cdot c^2$)

12.- Analitza quin o quins dels termes, “acció a distància” i/o “instantània” (immediata) són correctes dins de cadascun dels marcs teòrics següents i justifica la resposta.

Mecànica clàssica:

Electrodinàmica maxwelliana:

Relativitat especial o restringida:

Relativitat general: