



A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”  
SEBEȘ, 2017

## **EFFECTUL FOTOELECTRIC ȘI EINSTEINUL (Es) - UNITATEA DE MĂSURĂ A RADIAȚIEI LUMINOASE, Partea I-a**

Mircea BEJAN, Ioana BĂLAN, Barbu BEJAN

### **PHOTOELECTRIC EFFECT AND EINSTEIN (Es) – RADIATION MEASUREMENT UNIT LIGHT - PART I**

It presents aspects of the life of Albert Einstein, physicist and exceptional man, whose existence was conducted under a single slogan: "Die Freude am Denken" - the joy of thinking. The five famous theoretical works published by Albert Einstein in 1905 had a profound effect on the development of modern physics.

The work on the phenomenon called the photoelectric effect will bring Nobel Prize for Physics in 1921 (reason premiers: "Research in theoretical physics and the discovery of the photoelectric effect").

Keywords: photoelectric effect, Nobel Prize for Physics, published works by Albert Einstein

Cuvinte cheie: efect fotoelectric, premiul Nobel pentru fizică, lucrări publicate de Albert Einstein

### **1. Fizicianul Albert Einstein**

Cele cinci celebre lucrări teoretice publicate de Albert Einstein în anul 1905<sup>1</sup> au avut un efect profund asupra dezvoltării fizicii moderne. În lucrările publicate la intervale scurte de timp în „Annalen

---

<sup>1</sup> pe care analiștii carierei lui Albert Einstein l-au denumit annus mirabilis – "anul miracolelor".

der Physik”, el se referă la: • stabilirea unuia din elementele de bază ale teoriei atomice<sup>2</sup>; • explicarea efectului fotoelectric, fundamentând astfel, mecanica cuantică<sup>3</sup>; • enunțarea „teoriei relativității” restrânse într-o primă lucrare intitulată „Despre electrodinamica corpurilor în mișcare” (predată în 30 iunie 1905) și o a doua, „Inerția unui corp depinde, oare, de cantitatea de energie înmagazinată”? (prezentată pe 27 noiembrie 1905) – în care introduce celebra relație dintre energie, masă și viteza luminii:  $E = mc^2$ ; • „Despre electrodinamica corpurilor în mișcare”, lucrare ce redă conceptele autorului într-o exprimare sintetică, clară, incluzând doar câteva formule matematice, fără note de subsol sau vreo referire la alte lucrări<sup>4</sup>.

Mecanica relativistă (ale cărei baze au fost puse de către Albert Einstein) a modificat ideile de masă, impuls și energie. Masa unui corp nu este constantă, ci crește cu viteza sa, iar relația de echivalență a masei cu energia –  $E = mc^2$  – explică obținerea de energie prin fisiunea sau fuziunea nucleelor atomice (energia nucleară).

Altfel spus, energia și masa sunt forme diferite de exprimare a aceleiași materii. Sau, în alți termeni: energia este materie eliberată și, invers, materia reprezintă energie aflată în așteptarea eliberării sale. Cum  $c^2$  este o cifră enormă (circa  $9 \cdot 10^{10}$ ), formula lui Einstein stabilește că o cantitate inimaginabilă de energie se află înmagazinată în fiecare materie, fiind astfel inițiată/realizată trecerea de la „macrofizică” la „microfizică”.

În teoria relativității, spațiul (lungimea), sau timpul (durata) nu sunt mărimi absolute, ele depinzând de mișcarea sistemului de referință în care se face măsurarea acestora. Consecințele teoriei

---

<sup>2</sup> aplicând calculul probabilităților la mișcarea browniană (Robert Brown, 1773-1858) – mișcare moleculară continuă, intuită încă de Lucrețiu (Titus Lucretius Carus, poet și filosof latin, 98-55 î.Hr.), a obținut o valoare a numărului lui Amedeo Avogadro (1776-1856),  $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$ .

<sup>3</sup>a postulat cuanta de lumină, afirmând că lumina (care are un caracter dual: de undă și de particulă) se comportă ca un ansamblu de particule (numite mai târziu fotoni – a căror energie nu depinde de intensitatea luminii, ci de lungimea de undă – culoarea acesteia), putând elibera – prin impact – electronii din stratul superficial al unui obiect metalic.

<sup>4</sup> Albert Einstein a fundamentat teoria relativității restrânse, admițând două postulate: – legile naturii au aceeași formă în toate sistemele inerțiale și – viteza luminii, în vid sau într-un mediu omogen,  $c$ , este aceeași, în toate direcțiile și în toate sensurile, în raport cu orice sistem de referință în mișcare relativă uniformă. După formularea teoriei relativității restrânse (1905), Einstein s-a preocupat continuu de generalizarea acesteia. Astfel, într-o lucrare din 1916 – intitulată „Bazele teoriei relativității generalizate” – extinde principiul relativității la toate sistemele de referință și la toate fenomenele cunoscute, având la bază principiul echivalenței – enunțat de Einstein sub forma „Inerția și greutatea sunt manifestările uneia și aceleiași proprietăți ale corpurilor, deosebirea constă numai în modul de a privi lucrurile” sau, altfel spus, „forța gravitațională este o forță de inerție”!

relativității, practic, neobservabile în cazul vitezelor mici ale corpurilor, devin importante pentru vitezele foarte mari, care se apropie de viteza luminii. Într-o altă formulare a teoriei restrânse a relativității – pentru a o face mai ușor de înțeles – în lucrarea „Spațiu și timp”, în 1908, fostul profesor al lui Einstein, matematicianul ruso-german Herman Minkowski (1864-1909) a introdus conceptul de spațiu cvadridimensional (curb și finit), a cărui a patra dimensiune este timpul. Spațiul, timpul și materia se dovedesc a fi în strânsă interdependență. Matematic, spațiul este unit cu timpul într-o formă pătratică riemanniană cvadridimensională, ajungându-se la o lege generală a inerției, cuprinzând într-o singură expresie fenomenele de inerție și de gravitație.

Atât teoria restrânsă a relativității, cât și cea generalizată au primit numeroase confirmări experimentale (de exemplu, eliberarea energiei atomice și devierea razelor de lumină în apropierea unor mase mari – stele sau planete).

Contribuțiile deosebite ale lui Albert Einstein la dezvoltarea fizicii se rezumă astfel: ■ explicarea mișcării browniene cu ajutorul teoriei probabilităților, obținând și o valoare a numărului lui Avogadro; ■ utilizând teoria cuantelor, ajunge la ipoteza existenței fotonilor, putând explica efectul fotoelectric, stabilindu-i legile și fundamentând mecanica cuantică; ■ crearea teoriei relativității restrânse (1905) – care modifică legile mecanicii newtoniene, introducând echivalența dintre masă și energie ( $E = mc^2$ ); ■ generalizarea teoriei relativității (1916) privind sistemele fizice inerțiale și cele neinerțiale, fundamentând matematic teoria gravitației, într-un univers cvadridimensional, curb și finit; ■ formularea legilor acțiunii chimice a luminii și a teoriei căldurilor specifice ale solidelor, cercetând probabilitățile de emisie și de absorbție a luminii (determinând coeficienții lui Einstein); ■ studierea efectului giromagnetic (numit și efectul Einstein-de Haas); ■ încercarea elaborării unei teorii unitare asupra câmpului.

În onoarea sa, ca o recunoaștere a contribuțiilor și meritelor sale științifice, numele său a fost atribuit unei unități de măsură a radiației luminoase – un einstein (E) reprezentând energia unui mol de fotoni transmisă unui electron, iar cel de-al 99-lea element al sistemului periodic (actinide) a fost botezat einsteinium (Es).

Formula  $E = mc^2$  reprezintă "energia totală" a unui corp. Adică dacă un corp de masă "m" aflat în repaus și fără energie potențială este transformat complet în energie sub formă de fotoni, rezultă o cantitate de energie conform formulei. Faimoasa ecuație a lui Einstein  $E = mc^2$  spune că masa (m) este echivalentă cu energia (E). A fost nevoie de

geniul lui Einstein pentru a se realiza legătura dintre cele două mărimi. Pătratul vitezei luminii în vid ( $c^2$ ) intervine în această ecuație pentru a determina cu exactitate câtă energie conține o anumită masă.

Deși pare simplă, ecuația relativității are implicații profunde, cum ar fi regula că nici un obiect care are masă nu va putea vreodată să depășească viteza luminii. Aceasta deoarece energia totală a unui obiect crește pe măsură ce crește și viteza. Pe măsură ce un obiect se apropie de viteza luminii, masa sa se apropie de infinit. Aceasta înseamnă că ar lua o cantitate infinită de energie pentru a accelera un obiect până la viteza luminii.

În lumea proceselor subatomice, masa particulelor se poate transforma în energie sub formă de lumină, căldură sau energie cinetică. Și invers, și energia se poate transforma în masă. Tocmai această idee este pusă în practică de acceleratoarele de particule care zdrobesc laolaltă particulele ce se mișcă foarte rapid. Energia mare din aceste ciocniri se transformă în noi particule, care pot avea masă mult mai mare decât cele implicate inițial în coliziune.

Visul fizicienilor care caută să realizeze fuziunea nucleară este tocmai transformarea masei în energie. Căci atunci când fuzionează protoni și neutroni rezultând un nucleu, acest nucleu prezintă o masă mai mică decât suma maselor constituenților săi. Diferența de masă se manifestă sub formă de energie, care poate fi, în principiu, captată pentru a fi folosită:  $E = mc^2$  !

Convertibilitatea masă-energie are consecințe extinse. Motorul automobilului e alimentat cu combustibili fosili, care provin din plante preistorice. Plantele au captat energie solară, care a fost produsă de fuziunea nucleară din Soare. Prin urmare, toate activitățile de pe Pământ sunt până la urmă alimentate de  $E = mc^2$ .

## **2. Câteva considerații privind pe Albert Einstein și laboratorul din Zürich în care savantul a studiat lumina**

Cartea fizicienei Françoise Balibar, „*Einstein. Bucuria gândirii*”, este al șaptelea volum din Colecția ENCICLOPEDICA, o selecție din seria Découvertes, marcă a prestigioasei edituri franceze Gallimard, adusă în premieră pe piața românească de Cotidianul, alături de Editura UNIVERS. Cu sprijinul proiectului imobiliar Băneasa, monografiile din serie costă, împreună cu ziarul, 9,9 lei, în timp ce, în Franța sau pe amazon.com, prețul lor variază între 8 și 14 euro. Specialista în Einstein, Françoise Balibar, profesoară la Universitatea Paris-VII, s-a ocupat de editarea în limba franceză a „Operelor alese” ale fizicianului german, a publicat un manual de mecanica cuantică,

două cărți în Colecția „Filosofii PUF” și alte câteva opere despre munca savantului care a formulat teoria relativității.

În volumul oferit de Cotidianul, autoarea reconstituie viața lui Einstein, fizician și om de excepție, a cărui existență s-a desfășurat sub o unică deviză: „Die Freude am Denken” - bucuria gândirii. Spre deosebire de restul numeroaselor cărți despre viața lui Einstein, care de obicei se concentrează pe un singur aspect din personalitatea complexă a savantului, monografia autoarei franceze face o trecere în revistă atât a vieții personale a fizicianului, cât și a cercetărilor sale neobosite. Volumul este structurat în șapte capitole la care se adaugă o serie de 150 de mărturii și documente.

1905 este anul miraculos, așa cum îl numește Françoise Balibar, când Albert Einstein a publicat rezultatele mai multor studii teoretice, care l-au făcut cunoscut și care au revoluționat fizica. În decursul a șase luni, fizicianul, pe vremea aceea un simplu angajat al Biroului de Brevete din Berna, a descurcat „ghemul în care se zbătea fizica” acelor vremuri, scrie Balibar. Mai întâi a demonstrat că opoziția dintre continuu și discontinuu nu este valabilă, lumina fiind și ea constituită din particule la fel ca materia, iar mai apoi, a construit o teorie a luminii fără eter, abolind astfel asimetria dintre mecanică și electromagnetism, adică „teoria relativității restrânse”. La scurt timp, Einstein, un atomist convins (a aparținut unei generații de fizicieni care, chiar dacă nu văzuseră niciodată atomii, erau convinși de existența lor) a descoperit cuantele de lumină. El s-a concentrat în mod special asupra producerii luminii și asupra modului în care un obiect încălzit emite lumina. Eliminând din ecuație eterul, considerat imobil și folosind concluzia că lumina nu e nici continuă, nici discontinuă, fizicianul a reușit să construiască o nouă teorie bazată pe două principii: a luminii (a cărei viteză este întotdeauna  $c$ ) și al relativității (nimic nu poate să fie absolut imobil). A reieșit teoria invariațiilor sau a relativității ( $E = mc^2$ ), una dintre cele două teorii fundamentale cu ajutorul căreia oamenii de știință descriu astăzi universul. „Este de admirat și excelenta sănătate mentală a tânărului Einstein. Imaginați-vă efectul destabilizator pe care îl putea avea faptul de a fi rezolvat, la douăzeci și șase de ani, singur și cu o uimitoare ușurință, probleme care îi aduceau la disperare pe savanții cei mai experimentați”, notează autoarea volumului.

**Relativitatea s-a aplicat la GPS.** „Einstein ar fi uimit dacă ar ști că celei mai abstracte dintre teoriile sale, relativitatea generalizată, i s-a găsit o aplicație practică: GPS-ul”, scrie Balibar în „Mărturiile și documentele” de la sfârșitul monografiei, referindu-se la Global Positioning System sau sistemul de poziționare globală. Principiul după

care funcționează este unul simplu: 24 de sateliți au fost plasați pe orbită în jurul Pământului, fiecare fiind echipat cu un ceas atomic, de mare precizie, care emite la intervale regulate semnale care dau momentul de emisie și poziția satelitului. Datorită modului în care sunt așezați sateliții, un utilizator de GPS primește cel puțin patru semnale. Poziția vehiculului dotat cu GPS este calculată prin metoda numită „triangulație”. Astfel, din diferența dintre timpul de emisie și timpul de recepție, aparatul deduce distanțele utilizatorului față de cei patru sateliți de la care primește semnale.

Elev cu probleme „După părerea mea, afectezi reputația clasei prin simpla dumitale prezență”, i se adresa în gimnaziu un profesor elevului Albert Einstein. Savantul german nu a fost niciodată un student eminent, preferând întotdeauna cercetarea studiului teoretic. De altfel, el nu și-a terminat niciodată studiile secundare, pentru că nu se putea împăca prea bine cu regimul aproape militar din școala nemțească. A urmat apoi cursurile liceului cantonal din Aargau, Elveția, iar după aceea s-a înscris la Politehnica din Zürich. După Universitate, Einstein a lucrat ca tutore și profesor, iar în 1902 și în anii săi de glorie a fost angajat ca examinator la Institutul Elvețian de Patentare de la Berna. În 1903 s-a căsătorit cu Mileva Marić, care îi fusese colegă la politehnică, cu care a avut doi fii, dar în cele din urmă au divorțat. Ulterior, Einstein s-a recăsătorit. În „Einstein. Bucuria gândirii”, autoarea acordă un spațiu generos unor aspecte din viața personală a fizicianului german.

### 3. Efectul fotoelectric

Einstein a exprimat teoria<sup>5</sup> potrivit căreia lumina este constituită din particule individuale (fotoni), teorie care demonstrează proprietățile acesteia ce o apropie de particule, deși în mod global lumina se comportă ca o undă. Această ipoteză, reprezentând un pas important în dezvoltarea teoriei cuantice, a fost obținută prin examinarea de către Einstein a efectului fotoelectric, fenomen prin care anumite substanțe solide emit, în momentul în care sunt iluminate, particule încărcate cu electricitate. Spre exemplu, o placă de zinc proaspăt lustruită, încărcată negativ se descarcă dacă este expusă luminii ultraviolete. Acest fenomen este numit *efect fotoelectric* (figura 1). Aceasta activitate îi va aduce ulterior premiul Nobel pentru fizică, din anul 1921 (Motivul premierii: *”Cercetări de fizică teoretică și descoperirea efectului fotoelectric”*).

---

<sup>5</sup> un punct de vedere heuristic asupra producerii și transformării luminii.

Deci, **efectul fotoelectric** este emiterea de electroni din materie în urma absorbției de radiație electromagnetică (de exemplu radiație ultravioletă sau raza X. Un termen învechit pentru efectul fotoelectric este **efectul Hertz**).

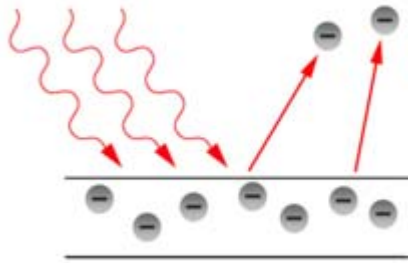


Fig. 1 Efectul fotoelectric. Sub acțiunea luminii (ultraviolete), electronii părăsesc metalul

Când o suprafață metalică e expusă unui flux de radiație electromagnetică poate să genereze, în anumite condiții, electroni liberi, care produc un curent electric dacă sunt accelerați sub acțiunea unui câmp electric. Electronii emiși prin efectul fotoelectric se numesc **fotoelectroni**. Experimental s-a constatat că pentru a observa emisia de electroni este nevoie ca radiația electromagnetică să aibă o frecvență deasupra unei limite inferioare care depinde de natura materialului sau, echivalent, lungimea de undă trebuie să fie sub o anumită valoare. Intensitatea fluxului de radiație incident influențează mărimea curentului electric produs, dar nu determină apariția fenomenului.

Efectul fotoelectric poate fi explicat simplu dacă se acceptă ipoteza că radiația electromagnetică este formată din particule (numite fotoni). Fiecare foton poartă o cantitate de energie proporțională cu frecvența de oscilație a câmpului electromagnetic. La incidența fotonului pe suprafața unui metal este posibil ca această energie să fie transferată unui electron din rețeaua cristalină a metalului. Dacă energia transferată este suficientă pentru ca electronul să depășească bariera de potențial pusă de interfața dintre metal și vid, atunci electronul poate părăsi cristalul și deveni liber. Fiecare metal, prin proprietățile sale cristaline, prezintă valori diferite ale pragului de energie impus electronilor la părăsirea suprafeței, ceea ce explică faptul că metale diferite încep să emită fotoelectroni de la frecvențe diferite.

Importanța acestui fenomen în dezvoltarea domeniului fizicii constă în a sprijini dualitatea undă-corpusul a radiației electromagnetice. Explicația matematică a fenomenului a fost dată de Albert Einstein, pe baza unor ipoteze cuantice formulate de Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947).

Energia unui foton poate fi transferată unui singur electron. Astfel, dacă energia fotonului este sub pragul de extragere a electronului din cristal, mărirea numărului de fotoni (intensificarea fluxului de lumină) nu poate ajuta la declanșarea efectului fotoelectric. Energia fotonului incident se conservă, o parte regăsindu-se în rețeaua cristalină a metalului și o parte este transferată sub formă de energie cinetică electronului devenit liber.

Albert Einstein a explicat efectul fotoelectric<sup>6</sup>, postulând cuanta de lumină și afirmând că lumina (fiind, simultan, un fenomen ondulatoriu și unul corpuscular, având deci, un caracter dual: undă-particulă) se comportă ca un ansamblu de particule (numite, mai târziu, fotoni<sup>7</sup>, a căror energie nu depinde de intensitatea luminii ci de lungimea de undă – culoarea acesteia) putând elibera – prin impact – electronii din stratul superficial al unui obiect metalic. Cantitativ, efectul fotoelectric se poate descrie folosind relația:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv^2 = \varphi + E_c,$$

unde  $h$  este constanta lui Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s);  $hf$  este energia fotonului incident;  $f$  este frecvența fotonului incident;  $f_0$  este frecvența minimă la care are loc efectul fotoelectric;  $m$  și  $v$  sunt masa, respectiv viteza electronului după ieșirea din cristal;  $\varphi = hf_0$  lucrul mecanic de extracție și  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  energia cinetică a electronului.

Investigațiile de la sfârșitul secolului al XIX-lea demonstrează că efectul fotoelectric are loc și cu alte materiale, dar numai dacă lungimea undelor radiațiilor incidente este destul de scurtă. Pentru fiecare material există o lungime de undă limită și efectul fotoelectric se observă numai dacă lungimea de undă incidentă este mai mică decât cea limită. În caz contrar nici măcar o intensitate mare a radiației nu poate declanșa efectul, lucru aparent misterios pentru oamenii de știință.

Prof.em.Dr.Ing. Mircea BEJAN, e-mail: Mircea.Bejan@rezi.utcluj.ro  
Ing. Ioana BĂLAN, Metz – Franța, membri AGIR  
Prof. Barbu BEJAN, Paris - Franța

---

<sup>6</sup> confirmând teoria corpusculară a luminii și fundamentând, astfel, mecanica cuantică.

<sup>7</sup> Deci, lumina conține particule (*fotoni*), și energia acestor particule este proporțională cu frecvența luminii. Există un minimum de energie (dependent de material) care este necesar pentru a scoate un electron de pe suprafața plăcii de zinc sau a altui corp solid (*lucrul mecanic de extracție*). Dacă energia unui foton este mai mare decât această valoare, electronul poate fi emis.