

EXPERIMENTUL FRANCK-HERTZ CU TUB DE NEON

I. Scopul lucrării:

Experimentul Franck-Hertz reprezintă o demonstrație practică importantă a existenței în atom a stărilor discrete de energie așa cum au fost ele postulate de modelul lui Bohr. În plus, permite măsurarea directă a energiei absorbite de atomul de neon pentru a efectua o tranziție de pe nivelul fundamental pe o stare excitată.

Prin această lucrare ne propunem:

- să înregistrăm o curbă de tip Franck-Hertz pentru neon;
- să măsurăm cantitatea de energie absorbită de atomi în urma ciocnirilor inelastice cu electronii;
- să interpretăm rezultatele obținute în termeni de energie absorbită de atomii de neon la tranziția de pe nivelul fundamental pe un nivel de energie excitat;
- să identificăm ce nivele de energie sunt implicate în obținerea curbei Franck-Hertz pentru neon.

II. Teoria lucrării:

Experimentul Franck-Hertz este considerat a fi unul dintre cele mai importante experimente clasice ce confirmă teoria cuantică. Prin acest experiment, James Franck și Gustav Hertz demonstrează existența nivelelor de energie discrete din atom așa cum au fost ele postulate în modelul Bohr [1,2]. Rezultatele experimentului arată că atomii pot absorbi energie numai în cantități discrete indiferent de modul de transfer al acesteia (prin excitare optică sau ciocniri mecanice) realizând astfel trecerea de pe un nivel de energie joasă pe un nivel de energie superioară.

În experimentul original [3] autorii folosesc un tub cu vapori de mercur la presiune joasă în care atomii de mercur sunt excitați în urma interacției cu electroni accelerați. Ideea acestor experiențe este următoarea: atomii sau moleculele unui gaz dintr-un tub de descărcare de presiune joasă sunt bombardați cu electroni. Se studiază distribuția vitezelor electronilor înainte și după ciocnire. Dacă ciocnirile sunt elastice, distribuția vitezelor nu se schimbă în urma ciocnirilor; dimpotrivă, în cazul ciocnirilor inelastice, o parte din electroni își pierd energia, cedând-o atomilor cu care s-au ciocnit și distribuția vitezelor electronilor se modifică.

Această lucrare studiază varianta modificată a experimentului Franck-Hertz, în care atomii de mercur sunt înlocuiți cu atomi de neon. Într-un tub de sticlă cu neon la presiune joasă, menținut la temperatură constantă, sunt accelerați electronii emiși de catod. Schema de principiu a tubului folosit în acest caz este prezentată în figura 1 [4]. Acesta este format dintr-un tub umplut cu neon la presiune joasă și un set de 4 electrozi planari. Electronii sunt emiși de catodul C și puși în mișcare prin potențialul pozitiv U_3 al grilei G_1 aflată în imediata vecinătate a catodului. (vezi figura 1). În

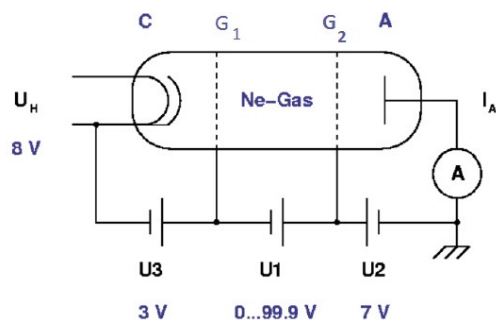


Figura 1: Schema de principiu a tubului de măsură [4]

continuare, electronii sunt accelerați de tensiunea U_1 , până la grila G_2 . Pe distanța dintre grila G_1 și anod, electronii se ciocnesc cu atomii de neon, două procese fiind specifice:

1. **ciocniri elastice** în care energia cinetică totală se conservă. Deoarece masa electronului este mult mai mică decât masa atomului de neon, electronul își păstrează practic energia și implicit viteza, iar direcția de mișcare poate fi modificată.
2. **Ciocniri inelastice** în care electronii pierd o parte din energia cinetică prin transferul ei către atomul de neon având drept consecință excitarea acestuia. În acest proces, electronul este încetinit și își schimbă traiectoria.

Astfel, pentru o anumită valoare a tensiunii U_1 , energia cinetică a electronilor accelerați este suficientă pentru ca, în urma unei ciocniri inelastice cu atomul de neon, să determine excitarea acestuia prin trecerea pe un nivel excitat. Procesul este însoțit de o pierdere de energie pentru electronul incident, care astfel nu mai are suficientă energie pentru a învinge câmpul de frânare aplicat între grila G_2 și anodul A dat de tensiunea U_2 . În aceste condiții, curentul anodic măsurat înregistrează un minim. Pentru valori ale tensiunii U_1 mai mari, energia cinetică a electronilor este suficient de mare astfel încât aceștia să realizeze 2 sau mai multe ciocniri inelastice cu atomii de neon pe spațiul dintre anod și catod. Astfel, se obține o serie de minime de curent ca în figura 2.

Experimental se observă că graficul $I_A(U_1)$ prezintă maxime și minime echidistante ca acelea din figura 2. Aceste minime nu sunt totuși foarte bine definite datorită distribuției termice inițiale după viteze a electronilor. Energia de excitare a atomilor de neon se determină din diferența de potențial dintre două minime succesive.

Conform teoriei cuantice, atomii de neon prezintă o serie de nivele de energie ce pot fi excitate în urma interacției cu electronii (vezi figura 3 și anexa 1 pentru detalii), cele mai joase fiind nivelele 3s cu energii cuprinse în domeniul 16,5-16,8eV și nivelele 3p cu energii în domeniul 18,3-18,9eV [5].

Eficiența ciocnirii dintre electroni și atomii de neon este în general descrisă de secțiunea eficace de ciocnire. [6]. Pentru ciocnirile electron-atom de neon, în literatură [7] se găsesc date despre secțiunea eficace de excitare a atomilor de neon prin ciocniri cu electronii. În anexa 2 sunt prezentate astfel de date care arată că secțiunile eficace de excitare pentru nivelele superioare din 3s și cele inferioare din 3p sunt comparabile.

Dezexcitarea stărilor 3p spre nivelul fundamental este posibilă numai prin intermediul stărilor 3s. Radiația emisă la tranziția între nivelele 3p-3s cade în domeniul vizibil și astfel poate fi observată cu ochiul liber.

Pentru tensiuni de accelerare mari, în zona G_1G_2 se vor observa zone luminoase discrete roșii care corespund zonelor cu o densitate de excitare mai mare a atomilor de neon pe nivelele 3p.

În lucrare se măsoară intensitatea curentului anodic pentru tubul cu neon funcție de tensiunea de accelerare aplicată. Se determină energia de excitare a atomilor de neon din pozițiile minimelor de curent pe curba $I_A(U_1)$. Se compară rezultatele obținute cu cele din literatură.

III. Dispozitivul experimental:

Dispozitivul experimental este prezentat în figura 4 și cuprinde:

1. tub cu descărcare în neon cu soclu și conexiuni;

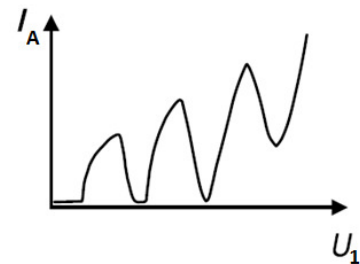


Figura 2: Exemplu de curbă curent-tensiune măsurată în experimentul de tip Franck-Hertz cu neon

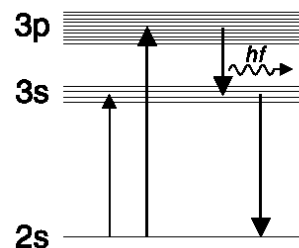


Figura 3: Diagrama simplificată a tranzițiilor posibile pentru neon în urma ciocnirilor inelastice cu electronii

2. unitatea de comandă și control cu rol de sursă multiplă de tensiune special concepută pentru alimentarea tubului cu neon, măsurarea și controlul tensiunilor aplicate;
3. interfață și calculator cu soft dedicat acestei experiențe.



Figura 4: Dispozitivul experimental Franck-Hertz [4]

Tubul Franck-Hertz umplut cu neon funcționează la temperatura camerei. Tubul de sticlă conține un sistem de 4 electrozi plani (vezi figura 1). Grila de comandă, G_1 , este situată în vecinătatea catodului, C. Grila de accelerare, G_2 , este poziționată la o distanță mai mare de catod, în fața anodului, A, dar în imediata vecinătate a acestuia. Catodul este încălzit printr-o metodă indirectă, folosind tensiunea U_H , pentru a preveni apariția unei diferențe de potențial de-a lungul acestuia. Electronii sunt emiși de catodul cald și formează un nor de sarcină în vecinătatea acestuia. Acești electroni sunt atrași de grila de comandă G_1 , care se găsește la un potențial pozitiv față de catod, U_3 . În acest fel, grila de comandă asigură practic un curent de emisie constant, independent de tensiunea de accelerare aplicată între cele două grile G_1 - G_2 . Între anod și grila de accelerare G_2 se aplică o tensiune inversă, U_2 , care va împiedica electronii cu o energie cinetică mică, sub o anumită valoare de prag, să atingă anodul colector.

Utilizând sursa de alimentare multiplă, pe tub se aplică o tensiune de accelerare U_1 variabilă între 0 și 99V. Se măsoară curentul anodic pentru valori constante ale tensiunii de comandă U_3 și respectiv ale tensiunii de frânare U_2 .

IV. Procedura de măsurare

1. Identificați elementele montajului experimental conform figurilor 4 și 1.
2. Verificați că sunt realizate următoarele conexiuni: cablul de 5 pini pentru aplicarea tensiunii U_H între sursa de alimentare multiplă (2) și soclul lămpii (1); cablu BNC pentru înregistrarea curentului anodic între unitatea de comandă și control (2) și soclul lămpii (1); cablu RS232 între unitatea de comandă și control (2) și calculator (3).
3. Alimentați unitatea de comandă și control (2).
4. Din butonul **FUNCTION**, alegeți varianta de lucru pentru înregistrarea curbei Franck-Hertz cu ajutorul interfeței calculatorului (3), selectând opțiunea **PC**;
5. Deschideți de pe desktop aplicația software "**Measure**". Din bara de meniuri alegeți **File** => **New measurement**. O fereastră cu opțiuni de setare a parametrilor de funcționare ca în figura 5 se va deschide. În această fereastră se vor fixa următorii parametri:

- de funcționare: U_H, U_1, U_2, U_3 – se folosesc valorile notate pe soclul lămpii;
- de măsurare: mode: automatic control; Channels – current I_A ; display – U_1 și I_A .

6. Apăsați butonul “*Continue*” urmat de “*Start measurement*” pentru începerea măsurării automate. O înregistrare tipică este prezentată în figura 6.

ATENȚIE! Dacă în înregistrare apar abateri de la această formă opriți măsurarea și solicitați intervenția cadrului didactic.

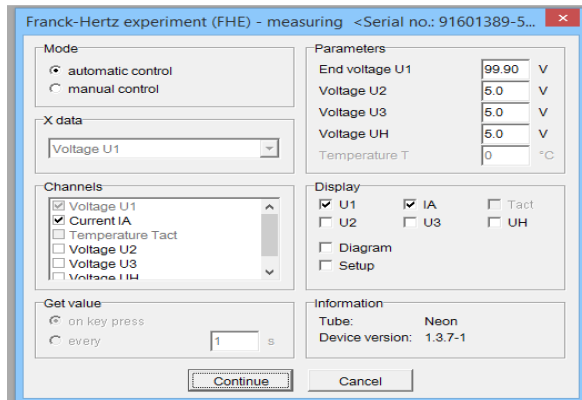


Figura 5: Fereastra de setare a parametrilor de funcționare și de înregistrare

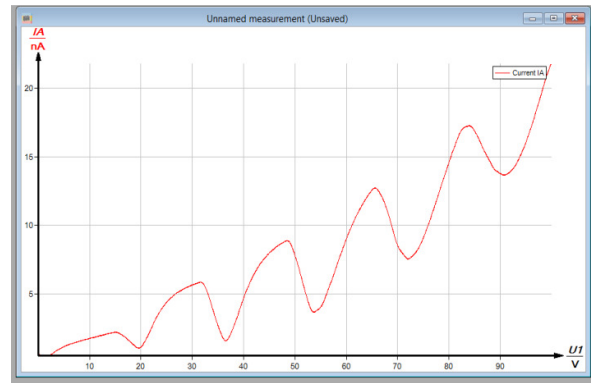


Figura 6: Exemplu de înregistrare a curbei $I=I(U_1)$

7. Din bara de meniuri alegeți *Analysis => Curve Analysis* în urma cărora apare o fereastră în care selectați “*extrema*” și “*visualize results*”. Închizând fereastra, valorile maximelor și minimelor vor fi marcate pe curbă.
8. Din reprezentarea grafică $I_A = f(U_1)$, citiți valorile de tensiune corespunzătoare minimelor de curent marcate și notați-le într-un tabel. Repetați măsurarea de câte ori este necesar și completați tabelul 1 în care indicele superior reprezintă numărul măsurării:

Tabelul 1: Tensiunea de accelerare, U_1 , în funcție de numărul minimului, n .

n	1	2	3	4	5
$U_1^1(V)$					
$U_1^2(V)$					
$U_1^3(V)$					
$U_1^4(V)$					
$U_1^5(V)$					
$U_1^6(V)$					
$\bar{U}_1(V)$					
σ_{U_1}					
$\Delta U_1(V)$	-				

9. Prin fereastra soclului ce conține tubul de descărcare, urmăriți cum, pentru tensiuni mari, apare o emisie de radiație portocalie corespunzătoare tranzițiilor în vizibil de pe nivelele 3p pe 3s ale atomului de neon.

V. Prelucrarea datelor

1. Folosind tabelul 1, calculați valorile medii ale tensiunilor de accelerare corespunzătoare fiecărui minim în parte și abaterile pătratice medii. Folosiți o foaie de excel pentru a calcula mai ușor.
2. reprezentați grafic tensiunile de accelerare medii, \bar{U}_1 , corespunzătoare fiecărui minim de curent funcție de numărul minimului, n, folosind funcția de reprezentare grafică **scatter** cu puncte. Selectați cu mouse-ul punctele experimentale și aproximați graficul cu o dreaptă folosind funcția **Add trendline** cu opțiunile **Linear** și **Display Equation on chart**. Panta dreptei astfel calculate se consideră teoretic a fi potențialul corespunzător primei stări excitate a atomului de neon.
3. Determinați energia de excitare pentru neon și exprimați-o în electron-volți și jouli. Comentați rezultatul prin comparație cu nivelele de energie ale neonului prezentate în anexa 1.
4. Folosind tabelul 1, calculați și reprezentați grafic diferența dintre tensiunile corespunzătoare a două minime succesive și numărul minimului, în conformitate cu ultimul rând al tabelului 1. Reprezentarea grafică se realizează cu funcția **scatter** cu puncte a excel. Observați gruparea punctelor din grafic pe două nivele. Explicați.
5. Reprezentați grafic $\bar{U}_1=f(n)$ pentru primele 3 minime, respectiv pentru ultimele 3 minime și calculați pantele dreptelor obținute la fel ca la punctul 2 și determinați energiile nivelelor 3s, și 3p, ale neonului. Comentați rezultatele prin comparație cu nivelele de energie ale neonului prezentate în anexa 1.
6. Știind că atomii excitați pe nivelul 3p se dezexcită prin nivelul 3s (conform figurii 3), determinați lungimea de undă a fotonilor emiși de atomii de neon la dezexcitarea acestora cu relația:

$$\lambda = \frac{hc}{E_{3p} - E_{3s}}$$

unde $h=6,6 \cdot 10^{-34}$ Js este constanta Planck, $c=3 \cdot 10^8$ m/s viteza luminii în vid, iar E_{3s} energia stării 3s pe care ajunge atomul în urma dezexcitării. Pentru determinarea lui E_{3s} consultați diagrama de energie pentru neon din anexa 1 și identificați energia stării 3s și tranziția electronică corespunzătoare radiației emise. Ce culoare are radiația emisă?

7. Știind că atomii excitați pe nivelul 3s se dezexcită direct pe nivelul fundamental, 2s, calculați lungimea de undă a radiației obținute în acest caz. Ce observați?
8. Din rezultatele obținute, estimați energia pierdută de un electron în urma ciocnirii inelastice cu un atom de neon.

VI. Întrebări și probleme :

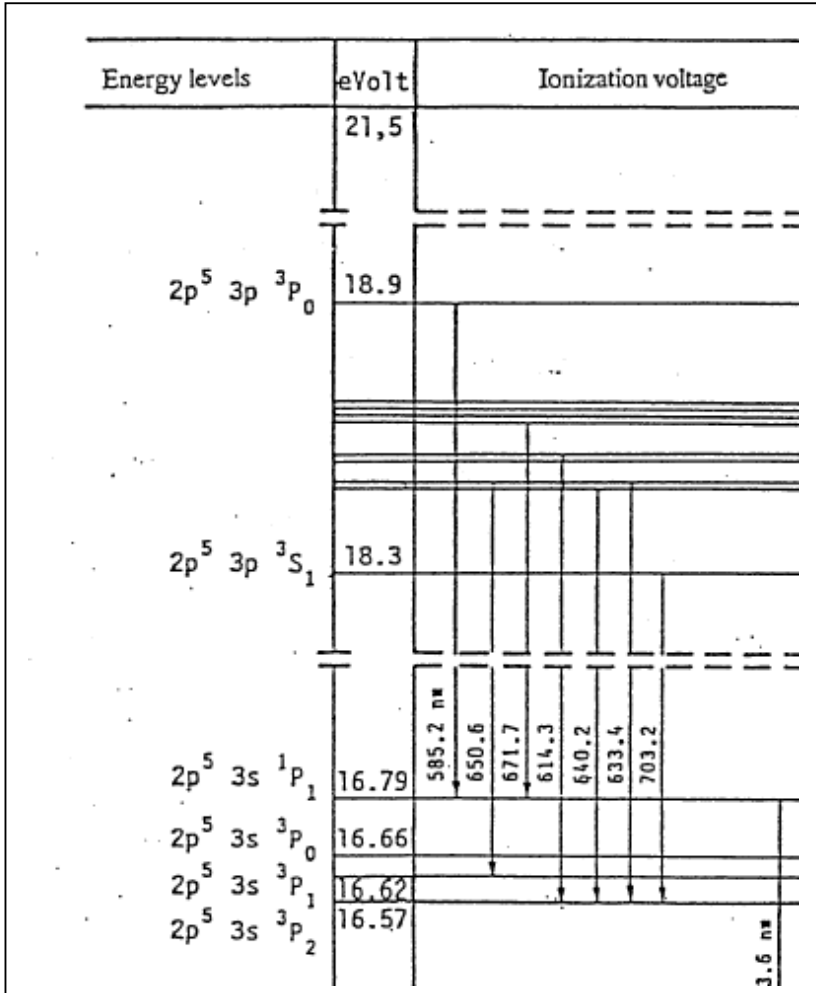
1. De ce considerați că efectul observat prin experimentul Franck-Hertz este suficient de important pentru a primi premiul Nobel ?
2. Ce înțelegeți prin nivele de energie discrete în cazul structurii atomice ?
3. Care este semnificația fizică a multiplurilor maxime și minime ce se observă în curba curent-tensiune înregistrată în acest experiment ?
4. Ce tipuri de interacții au loc între electroni și atomii de neon în zona dintre grilele a tubului ?
5. Explicați de ce tubul emite lumină portocalie ?

VII. Bibliografie :

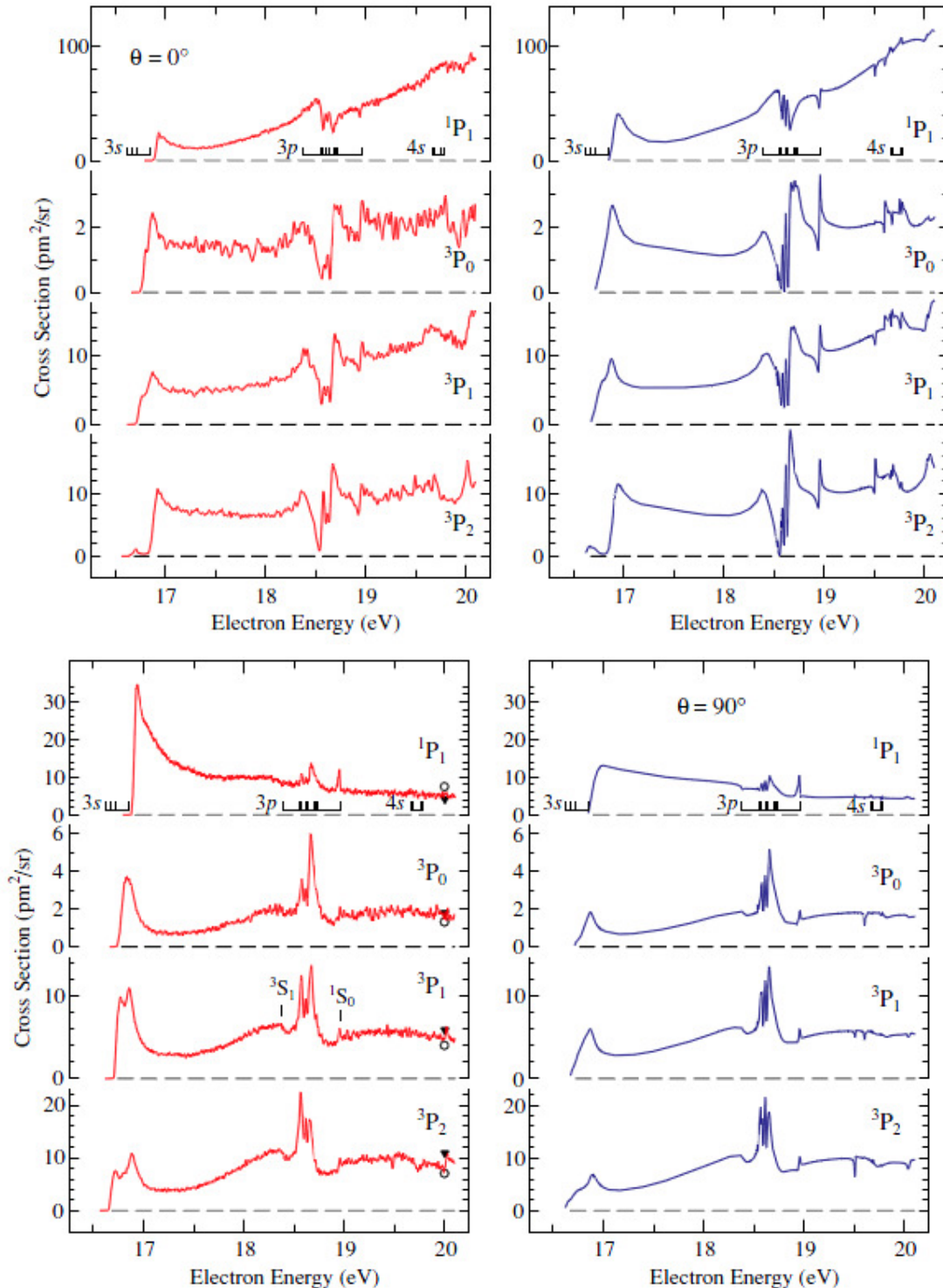
- [1] - https://en.wikipedia.org/wiki/Bohr_model
- [2] - <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bohr.html>
- [3] - J. Franck, G. Hertz, Verh. Deutsche Phys. Ges. **16**, 457 (1914)
- [4] - <http://repository.phywe.de/files/versuchsanleitungen/p2510315/e/p2510315.pdf>

- [5] – <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/neontable5.htm>
- [6] - [https://en.wikipedia.org/wiki/Cross_section_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross_section_(physics))
- [7] - Allan, K Franz, H Hotop, O Zatsarinny and K Bartschat, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 42 (2009) 044009 (11pp)
- [8] - Leybold Scientific, Franck–Hertz Experiment with Neon, 2003

ANEXA 1 : Structura de linii spectrale a neonului [8]



ANEXA 2 : Secțiunea eficace de excitare a nivelelor 3s, 3p și 4s în urma ciocnirii atomilor de neon cu electroni accelerați conform rezultatelor prezentate de M Allan, K Franz, H Hotop, O Zatsarinny and K Bartschat în „Absolute angle-differential cross sections for electron-impact excitation of neon within the first 3.5 eV above threshold”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 42 (2009) 044009 (11pp). Rezultate experimentale în partea stângă și estimări teoretice în dreapta pentru un unghi de împrăștiere $\theta=0^\circ$.



ANEXA 3 : Spectrograma măsurată pentru tubul cu neon

