



La espectrometría gamma en la enseñanza experimental de la física

R. L. Soto*¹, E. C. Torres Tapia¹, O. Baltuano^{1,2} y J. Rojas Tapia¹

¹Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, A.P. 14-0149, Lima, Perú

²Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Recibido 24 abril 2014 – Aceptado 22 noviembre 2014

En el presente trabajo, hacemos un análisis de las circunstancias de la enseñanza y el aprendizaje de la Escuela de Física y en ese contexto, analizamos un experimento que familiariza al estudiante con la instrumentación nuclear básica que incluyen las técnicas y los métodos de medición de la espectrometría de rayos gamma utilizando fuentes radiactivas de ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs y un detector de centelleo de NaI(Tl). Este experimento incluye, también, el desarrollo de un prototipo de analizador multicanal.

Palabras claves: Espectrometría gamma, detectores, analizadores multicanales, fuentes radiactivas.

The gamma spectrometry in the experimental teaching of Physics

In this work, we made an analysis of the learning and teaching circumstances of the Physics School and in this context, we analyze an experiment that familiarizes the student with basic nuclear instrumentation which includes techniques and measurements methods of gamma rays spectrometry using radioactive sources of ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and a NaI(Tl) scintillation detector. This experiment includes, also, the development of a multichannel analyzer prototype.

Keywords: Gamma spectrometry, detectors, multichannel analyzers, radioactive sources.

Varias décadas de investigación educativa dentro del sistema de la educación superior, han sido el marco de concreción de teorías pedagógicas enmarcadas en los paradigmas conductista, [1–4], cognitivo, [5–8] y constructivista, [9–12]. Estas teorías revolucionaron el quehacer didáctico-metodológico y constituyeron el punto de partida para la generación de importantes contribuciones en el estudio de las peculiaridades y las vías de optimización del proceso de enseñanza-aprendizaje.

La concepción constructivista del aprendizaje y de la enseñanza, desde una perspectiva psicoeducativa ha permitido precisar, en lo que respecta al ámbito del aprendizaje y la obtención del conocimiento, los factores determinantes del proceso, es decir: a) El desarrollo psicológico del individuo en el plano intelectual y su relación con los aprendizajes obtenidos. b) La importancia de establecer los intereses, las necesidades y las motivaciones de los alumnos en relación al proceso instructivo-educativo. c) El análisis de los contenidos curriculares, a fin de que se propenda el aprendizaje sobre la base de la significatividad de los contenidos. d) El reconocimiento de la existencia de diversos tipos y modalidades de aprendizaje, dando una atención

más integrada a los componentes intelectuales, afectivos y sociales. e) La búsqueda de las alternativas novedosas para la selección, organización y distribución del conocimiento, asociadas al diseño y promoción de estrategias de aprendizaje e instrucción cognitivas. f) La importancia de promover la interacción entre el docente y sus alumnos, así como entre los mismos, mediante el empleo de estrategias de aprendizaje cooperativo. g) La reconsideración del papel y lugar del docente en su condición de transmisor de conocimiento, guía y mediador del mismo, subrayando la ayuda y atención pedagógica diferenciada y regulada que desarrolla con el alumno.

En consecuencia, los principios asociados con la concepción constructivista del proceso aprendizaje-enseñanza, establecen claramente que el aprendizaje constituye un proceso constructivo interno, es decir, autoestructurante, por lo que resulta subjetivo y personal; se facilita mediante la mediación o interacción con los otros, lo cual le confiere un carácter social y cooperativo; es eminentemente un proceso de reconstrucción de saberes culturales que depende del nivel de desarrollo cognitivo, emocional y social, y de la naturaleza de las estructuras de conocimiento, teniendo

*rsoto@unmsm.edu.pe

como punto de partida, los conocimientos y experiencias previos que tiene el estudiante, [13].

El diseño de las formas de enseñanza caracterizadas por su significatividad exige por parte del docente o el colectivo, que se establezcan claramente los nodos cognitivos subyacentes de tal manera que se propicie la conexión de una nueva información con un concepto relevante ("sub-sensor") pre existente en la estructura cognitiva, esto implica que, las nuevas ideas, los conceptos y las proposiciones pueden ser aprendidos significativamente en la medida en que otras ideas, otros conceptos u otras proposiciones relevantes estén adecuadamente claras y disponibles en la estructura cognitiva del individuo y que funcionen como un punto de anclaje a las primeras, [14–16]. De esta manera, la inclusión y el anclaje conducen a una estructura cognitiva sólida caracterizada por su organización y posibilidad de uso lo cual demanda el desarrollo de nuevos materiales y nuevas formas de enseñanza con significatividad lógica y psicológica.

Metodología

En primer lugar, analizamos la estructura y los contenidos incluidos en el plan de estudios vigente a fin de determinar qué aspectos o grupos de éstos podrían constituir un concepto relevante pre-existente en la estructura cognitiva del estudiante de Física de la Facultad de Ciencias Físicas en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en relación con el aprendizaje de la espectrometría gamma, una importante herramienta experimental del laboratorio de Física Nuclear. Este estudio condujo a establecer los siguientes vínculos entre cursos precedentes: a) Análisis Matemático I: Integración mediante sumas de Riemann. b) Análisis Matemático II: Aproximación de funciones mediante desarrollos polinómicos de orden n . c) Análisis Matemático IV: Funciones de distribución de probabilidades. d) Metodología del Trabajo en Física: Tratamiento de los datos experimentales. e) Programación e Informática: Programación estructurada y algoritmos. f) Electrónica Análogo-digital: Circuitos analógicos y digitales. Aplicaciones. Instrumentos digitales de medida y control. g) Física Contemporánea. Mecanismos de interacción y pérdidas energéticas. h) Física Experimental: Métodos experimentales. Métodos computacionales. Diseño y montaje de experimentos. i) Introducción a la Física del Medio ambiente: Contaminación radiactiva.

Con los anteriores presupuestos y con el interés de potenciar el carácter de sistema inherente a la formación del egresado de la especialidad de Física se procedió a planear la introducción de tareas concernientes a la adquisición y procesamiento de espectros de radiación gamma, utilizando un analizador multicanal diseñado y construido con fines docentes, [17–22], como se muestra en la Fig. 1, ya que la utilización de éstos no es exclusiva de la física

nuclear experimental y su costo de adquisición lo torna privativo para la mayoría de los laboratorios docentes de pregrado.



Figura 1: Analizador multicanal de 1024 canales con conexión USB.

Efecto fotoeléctrico, Compton y formación de pares

Forma parte del acervo cultural incorporado por el curso de Física Nuclear que el estudiante comprenda los mecanismos básicos de la transferencia de energía como son el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares desde el punto de vista experimental ya que asignaturas precedentes discuten la esencia física de estos procesos como se muestra en la Fig. 2. Lo anterior se realiza mediante la observación de los espectros experimentales que se muestran en las Figuras 3, 4, 5 y 6 que muestran las alturas de los pulsos en función del número de canales.

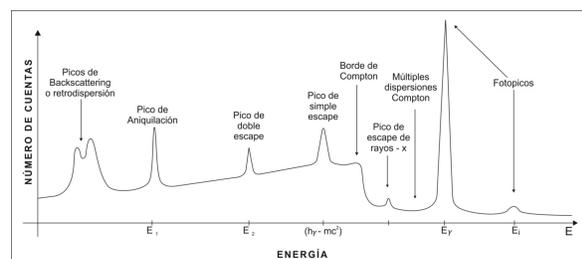


Figura 2: Esquema de un espectro de radiación gamma para visualizar los efectos que frecuentemente se presentan en un espectro real en la espectrometría gamma.

Las interacciones producen efectos distintos en cada uno de los espectros. En el efecto fotoeléctrico absorbe toda la energía de la radiación gamma, produciendo fotoelectrones. Esto produce un pico correspondiente a la energía del quantum gamma, (fotopico). En la interacción Compton, el quantum no es absorbido y el electrón se lleva parte de la energía, por lo tanto, la radiación deposita una

proporción de la energía en el detector. Otro fenómeno interesante es el de retrodispersión o *backscattering*, produciendo picos de menor energía.

Para el experimento descrito fue utilizado el siguiente equipamiento: a) Detector de Centelleo ORTEC (mono cristal de NaI (TI)-(2'x2'')-Mod. 905-3). b) Fotomultiplicador. c) Pre-amplificador (CANBERRA- Mod. 2007P). d) Amplificador. e) Fuente de alta tensión (600 V- H.V. SUPPLY -201). f) Analizador multicanal (1024 Canales ORBE) con conexión tipo USB [8] g) Fuentes radiactivas: ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs . h) PC – Pentium III –IBM (software de adquisición de datos), Monitor. i) Placas de Plomo (Pb), Cables coaxiales.

A continuación se presentan los espectros medidos en el laboratorio de física experimental, con el objetivo de que el estudiante diferencie los procesos involucrados en cada una de las fuentes radioactivas, sin ningún blindaje, Fig. 3 para el ²²Na, Fig. 4 para el ⁶⁰Co y Fig. 5 para el ¹³⁷Cs).

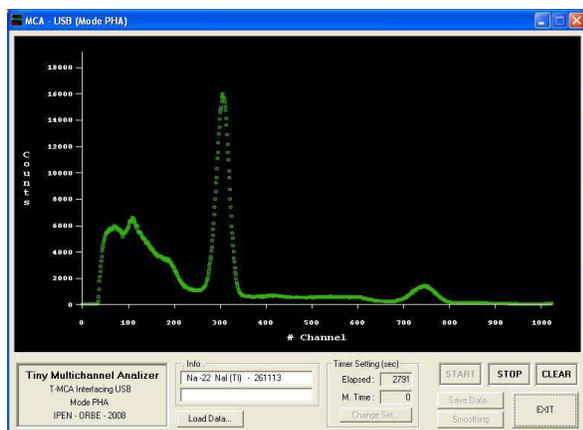


Figura 3: Espectro experimental de la radiación gamma de una fuente de ²²Na, sin blindaje.

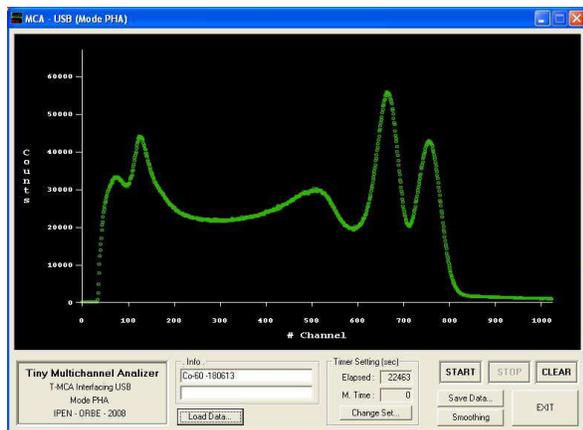


Figura 4: Espectro experimental de la radiación Gamma de una fuente de ⁶⁰Co, sin blindaje.

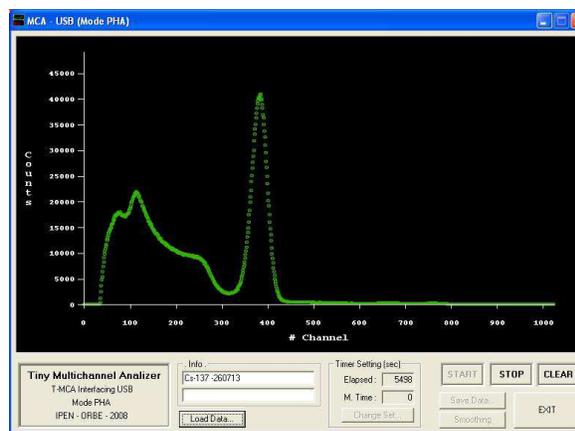


Figura 5: Espectro experimental de la radiación Gamma del ¹³⁷Cs, sin blindaje.

Estadística de conteo, las funciones de distribución y el tratamiento estadístico espectral

El carácter puramente aleatorio de la desintegración radiactiva y de los procesos de detección hace que los espectros de radiación requieran la utilización de la función de distribución de Poisson, como caso límite de las distribuciones multinomial y binomial; si además se considera el conocimiento previo de los usos y aplicaciones de la función de distribución de Gauss, puede comprenderse la contribución al logro de la significatividad de la enseñanza que se consigue con el sistema espectrométrico diseñado, al permitir la validación conceptual y la práctica al mismo tiempo de estas categorías estadísticas, [23–28].

De similar importancia en el sentido de propender una sólida estructura cognitiva en el estudiante, resulta la asimilación de la significación matemática y las particularidades del uso de la técnica de suavizamiento espectral, la cual, al ser aplicada correctamente, elimina las fluctuaciones estadísticas sin que se pierdan los elementos distintivos más importantes de los datos originales, [29].

Con el propósito descrito se posibilita la discusión de los efectos de suavizamiento utilizando las expresiones

$$Y_i = \frac{Y_{i-1} + 2Y_i + Y_{i+1}}{4} \quad (1)$$

y

$$Y_i = \frac{Y_{i-2} + 4Y_{i-1} + 6Y_i + 4Y_{i+1} + Y_{i+2}}{16} \quad (2)$$

para 3 o 5 puntos respectivamente y en el caso de adoptarse el suavizamiento con cantidad variable de puntos hasta un máximo de 21, en lugar de utilizarse métodos complicados de filtrado espectral por integrales de convolución, [23], se aproxima la zona de interés en el espectro por medio de un polinomio ajustado con el algoritmo de Levenberg–Marquardt, [30, 31]. En las expresiones (1) y (2), Y_i , representa los conteos por unidad de tiempo en el canal i -ésimo.

Eficiencia de detección

Al efectuar las mediciones de la actividad de una fuente calibrada o de muestras cuya actividad es desconocida, es aconsejable recurrir a la fundamentación teórica de la eficiencia y realizar los cálculos para las condiciones de

medición específicas de que se dispone, así, según [32,33], la eficiencia total de detección, en función de la energía de la radiación, la distancia fuente-detector, el espesor de la fuente y los coeficientes de absorción de la radiación, podrá evaluarse mediante

$$E_T(E_0) = \frac{1}{\pi R^2 h} \int_{b_0+d}^{b_0+d+h} dz \int_0^R x dx \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} d\phi (A + B) \quad (3)$$

con

$$A = \int_0^{\theta_1} \exp\left[\frac{-\mu_0(E_0)b_0}{\cos\theta}\right] \left(1 - \exp\left[\frac{-\mu(E_0)b_0}{\cos\theta}\right]\right) \sin\theta d\theta \quad (4)$$

$$B = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \exp\left[\frac{-\mu_0(E_0)b_0}{\cos\theta}\right] \left(1 - \exp\left[-\mu(E_0) \left[\frac{P(x,\phi)}{\sin\theta} - \frac{d}{\cos\theta}\right]\right]\right) \sin\theta d\theta \quad (5)$$

y

$$P(x,\phi) = -x \sin\phi + \sqrt{x^2 \sin^2\phi - (x^2 - a_0^2)}. \quad (6)$$

Además,

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{P(x,\phi)}{d+b}\right) \quad (7)$$

y

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{P(x,\phi)}{d}\right) \quad (8)$$

donde b_0 es el espesor del casquete metálico del detector; a es el diámetro del monocristal; b es la altura del monocristal; d es la distancia fuente-detector; R es el radio de la fuente emisora de los quantum gamma; h el espesor de la fuente; $\mu(E_0)$ es el coeficiente de absorción de la radiación en el material del detector y $\mu_0(E_0)$ es el coeficiente de absorción de la cubierta metálica que protege al cristal de centelleo.

A partir de la Ec.(3) quedan como casos particulares las expresiones para el cálculo teórico de la eficiencia total de una fuente puntual o una de disco, en la que no se considere el espesor de la misma y la fotoeficiencia se expresa como

$$E_P(E) = E_T(E)\Gamma \quad (9)$$

donde Γ expresa la fotofracción, es decir, la fracción del número total de eventos en el espectro de alturas de pulsos que se registran en el fotopico.

Desde el punto de vista experimental, la fotoeficiencia se evalúa mediante

$$E_{Pexp}(E) = \frac{A_n}{I_0 e^{\lambda t} \delta t_m} \quad (10)$$

donde A_n es el área neta del fotopico; I_0 es la actividad inicial de la fuente radiactiva; t es el tiempo transcurrido desde la preparación de la fuente hasta el momento en que se realizan las determinaciones, t_m el tiempo de medición y finalmente, δ es el coeficiente de bifurcación correspondiente.

Diferencias cualitativas en la interpretación de los espectros obtenidos para fuentes radiactivas sin y con blindaje de plomo

Como se puede apreciar de las Figuras 6 y 7, que muestran el espectro de la radiación gamma del ^{137}Cs , la configuración geométrica del sistema influye notoriamente. Los cambios más significativos se observan en la zona de *backscattering* donde la curvatura en el espectro del ^{137}Cs en ausencia del blindaje o la cobertura del plomo, presenta una variación de la pendiente negativa sin alteraciones, mientras que con el blindaje de plomo presenta una ligera perturbación en la pendiente. El estudiante tendrá que realizar los experimentos para verificar los efectos relacionados con la retrodispersión y el nuevo conocimiento asociado, es decir el grado de influencia que tiene la geometría de detección al calcular las áreas netas en las zonas o regiones de interés, especialmente en el caso de espectros de radiación complejos.

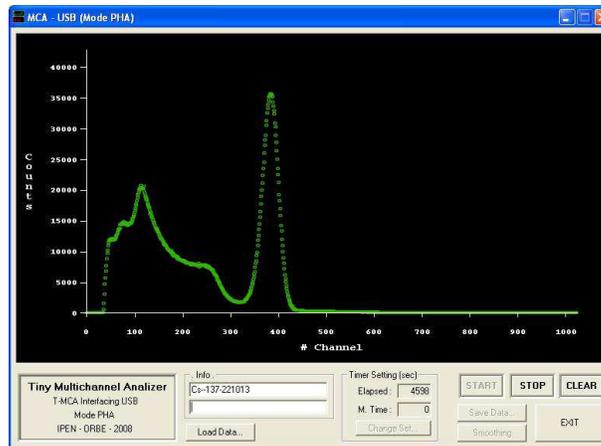


Figura 6: Espectro experimental de la radiación gamma del ^{137}Cs con blindaje de Pb, considerando un espesor del blindaje de 3.00 mm. Dentro de la zona comprendida entre los canales 50 y 300 son diferentes en la región del *backscattering* y el borde Compton, comparado con la Fig. 5.

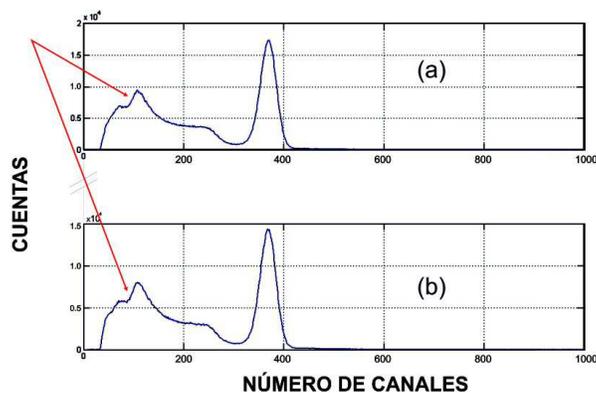


Figura 7: Se muestran los espectros de la radiación gamma del ^{137}Cs . a) sin blindaje de plomo, b) con blindaje de plomo.

Conclusiones

Como resultado del análisis curricular pertinente fueron identificados varios puntos nodales o subsensores pre-existentes en la estructura cognitiva del alumno de Física en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Sobre esta base, se diseñó un experimento en el cual no sólo se

garantiza la significatividad del aprendizaje y las vías para lograrlo, sino que respondiendo a la ineludible función del Docente en relación con la concepción de las diferentes formas de enseñanza, se dotó al Laboratorio de Física Experimental de un montaje capaz de recrear los aspectos tratados y otros que conforman el acervo cultural de la asignatura.

Referencias

- [1] D. Ausubel; *Psicología Educativa. Un punto de vista cognitivo*. Editorial Trillas, México (1978).
- [2] Th. Kuhn; *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo Cultura Económica. México. (1971).
- [3] D. Ausubel, J. Novak, L. Hanesian; *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. Segunda edición, Editorial Trillas, México (1983).
- [4] D. Gil; *Enseñanza de las Ciencias*, I, 26 (1983).
- [5] D. Gil, J.A Martínez-Torregrosa; *European Journal of Science Education*. 5,N 4, 447 (1983).
- [6] D. Hodson; *Studies in Science Education*, 12, 25 (1985).

- [7] D.Gil, J. Carrascosa; *European Journal of Science Education*, **7**(3), 231 (1985).
- [8] A. Pérez; *Paradigmas contemporáneos de investigación didáctica. La enseñanza, su teoría y su práctica*. Editorial Akal, Madrid (1985).
- [9] G. Fenstermacher, D. Wittrock; *La investigación de la enseñanza: Enfoques, teorías y métodos*. Editorial Paidós, Capítulo 3 "Tres aspectos de la filosofía de la investigación sobre la enseñanza", México (1989).
- [10] J. Bruner; (1966). *Studies in Cognitive Growth: A Collaboration at the Center for Cognitive Studies*. Wiley, Nueva York (1966).
- [11] J. Bruner; *Hacia una teoría de la instrucción*. Editorial Uteha, México (1972).
- [12] L. Vygotski; *Pensamiento y Lenguaje*. Editorial Pléyade, Buenos Aires (1985).
- [13] S. Brown, A. Collins, P. Duguid; *Educational Researcher*, **18**, 32 (1989).
- [14] D. Ausubel; *Adquisición y retención del conocimiento*. Editorial Paidós Ibérica, S.A. Barcelona (2002).
- [15] E. Covián, M. Celemin; *Enseñanza de las Ciencias*, **26**(1), 23 (2008).
- [16] I. Halloun; *Journal of Research in Science Teaching*, **33**(9), 1019 (1996).
- [17] E. Baltuano; *IPEN- Informe Científico tecnológico*, 146 (2008).
- [18] M. Hernández, R.L. Soto, E. Marín; *Revista Cubana de Física*. **XI**(2-3), 85 (1991).
- [19] R.L. Soto, E. Marín, M. Hernández; *Revista Cubana de Física*. **XI**(2-3), 77 (1991).
- [20] R.L. Soto, E. Marín, M. Hernández; *Revista Cubana de Física*. **XII**(2), 131 (1992).
- [21] E. Marín, R. L. Soto, M. Hernández; *Revista Cubana de Física*. **XII**(2), 38 (1992).
- [22] M. Hernández, R.L. Soto, E. Marín; *Instrumentación y Desarrollo*, (México). **3**(3) (1993).
- [23] G. Knoll; *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons (1979).
- [24] A. Melissinos, J. Napolitano; *Experiments in Modern Physics*, Second Edition, Academic Press (2003).
- [25] W. Leo; *Techniques for Nuclear and Particles Physics Experiments*, 2ed. , Springer Verlag, Berlín (1994).
- [26] H. Staudemaiered;: *PHYSICS EXPERIMENTS USING PCs,(Chap. 10.) Nuclear Spectrometry using a PC Converted to a Multichannel Analyzer*, J.S. Braunsfurth (Pag. 251-281), Springer Verlag, Berlín (1997) .
- [27] E. Alcusa-Sáez, F.Hueso-González; *Espectroscopia gamma con un detector NaI (TI) y un analizador multicanal*, Facultad de Física, Universidad de Valencia (2010).
- [28] CANBERRA. *Manual de equipos Canberra* (1998).
- [29] ORTEC. *Manual de equipos ORTEC* (1976,1990)
- [30] P. Quittner; *Gamma-Ray Spectroscopy*. Akadémiai Kiadó, Budapest (1972).
- [31] C. Shakarji; *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **103**, 633 (1998).
- [32] D. Budil,S. Lee,S. Saxena, J. Freed; *J. Magnetic Resonance, Series A.* **120**(2), 155 (1996).
- [33] N. Vartanov; *Espectrometría de la radiación gamma*. Editorial Atomizdat, Moscú (1970).
- [34] D. Prutchi, R. Prutchi; *Exploring Quantum Physics through Hands-on Projects*, John Wiley (2012).