



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Estudio de incertidumbres sistemáticas en experimentos de radiobiología
Title:	Study of systematic uncertainties in radiobiology experiments
Tutor/es:	Daniel Sánchez Parcerisa
E-mail tutor/es:	dsparcerisa@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Utilizando métodos de análisis estadístico, se estudiarán datos de literatura de diferentes experimentos de radiobiología, fundamentalmente ensayos clonogénicos con modelos celulares en 2D irradiados en instalaciones de protonterapia y radioterapia con haces de iones pesados. Estos datos se podrán comparar con datos experimentales obtenidos por el FLIPPER lab en los últimos años.

Con todo ello se elaborará un modelo predictivo que incluya las diferentes incertidumbres dosimétricas en los parámetros de ajuste derivados del modelo.

Metodología:

Se utilizará la base de datos PIDE (Particle Irradiation Database Ensemble), gestionada por GSI. El análisis de datos se llevará a cabo mediante MATLAB.

Si existe interés, existe la posibilidad de complementar el trabajo de análisis de datos con procesado de muestras en laboratorio húmedo, mantenimiento de cultivos celulares, etc.

Bibliografía:

[1] Friedrich T, Pfuhl T, Scholz M. Update of the particle irradiation data ensemble (PIDE) for cell survival. *J Radiat Res*, 62 (4), pp. 645-655 (2021). doi: 10.1093/jrr/rrab03

[2] Friedrich T, Scholz U, Elsässer T, Durante M, Scholz M. Systematic analysis of RBE and related quantities using a database of cell survival experiments with ion beam irradiation. *J Radiat Res*, 54 (3), pp. 494-514 (2013). doi:10.1093/jrr/rrs114

[3] Pfuhl T, Friedrich T, Scholz M. Comprehensive comparison of local effect model IV predictions with the particle irradiation data ensemble. *Med Phys*, 49 (1), pp. 714–726 (2022). doi:10.1002/mp.15343



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Dinámica termodinámica de canales iónicos en estados fuera de equilibrio: modelado biofísico
Title:	Thermodynamic dynamics of ion channels in non-equilibrium states: biophysical modeling
Tutor/es:	Sagrario Muñoz San Martín, Vicenta María Barragán García
E-mail tutor/es:	smsm@ucm.es, vmabarra@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento de los canales iónicos neuronales desde una perspectiva termodinámica, caracterizando los flujos de energía y la producción de entropía asociados a su actividad bajo condiciones fuera del equilibrio. Estudiando el modelado matemático de los canales iónicos se evaluará la eficiencia y la irreversibilidad de los procesos de transporte iónico en la transmisión de señales neuronales.

Metodología:

- Se analizará un modelo termodinámico de canales iónicos basado en sistemas fuera del equilibrio.
- Se analizará la producción de entropía y los flujos de energía asociados a la apertura y cierre de canales.
- Se estudiarán y analizarán las implicaciones biofísicas de la eficiencia energética en la señalización neuronal.- El estudio puede enfocarse desde diferentes puntos de vista, a elección del alumno.

Bibliografía:

- Nelson, P. (2004). *Biological Physics: Energy, Information, Life*. (W.H. Freeman and Company).
- N. Lakshminarayanaiah, *Transport Phenomena in Membranes*, 1969, Academic Press, New York
- A. Katchalsky, P.F. Curran, *Non Equilibrium thermodynamics in Biophysics*, Harvard University Press, Cambridge, 1967.

Una de las partes fundamentales de la metodología es la búsqueda bibliográfica por parte del alumno , en principio se le recomienda al alumno estas referencias como punto de partida.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Aplicación de los principios termodinámicos al estudio del impulso nervioso y la contracción muscular
Title:	Application of thermodynamic principles to the study of nerve impulse and muscle contraction
Tutor/es:	Vicenta María Barragán García, Sagrario Muñoz San Martín
E-mail tutor/es:	vmabarra@ucm.es, smsm@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

El objetivo del trabajo es analizar cómo se aplican los principios de la termodinámica a los procesos biofísicos del impulso nervioso y la contracción muscular. Se abordará el potencial de acción desde una perspectiva energética, considerando el transporte activo de iones como proceso termodinámicamente costoso, así como el papel del ATP en la contracción muscular según la teoría de los puentes cruzados.

Metodología:

- Se analizarán la estructura y propiedades físico-químicas de una célula nerviosa.
- Se revisarán los principios de la termodinámica relevantes para sistemas biológicos.
- Se analizará la propagación del impulso nervioso y la contracción muscular desde el punto de vista termodinámico.- Se estudiarán y analizarán los diferentes procesos de transporte que intervienen en el proceso completo, tanto desde el punto de vista electromagnético como termodinámico.- El estudio puede enfocarse desde diferentes puntos de vista, a elección del alumno.

Bibliografía:

-N. Lakshminarayanaiah, Transport Phenomena in Membranes, 1969, Academic Press, New York

-A. Katchalsky, P.F. Curran, Non Equilibrium thermodynamics in Biophysics, Harvard University Press, Cambridge, 1967.

- Nelson, P. (2004). Biological Physics: Energy, Information, Life. (W.H. Freeman and Company).

Una de las partes fundamentales de la metodología es la búsqueda bibliográfica por parte del alumno , en principio se le recomienda al alumno estas referencias como punto de partida.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Interacciones electrodébiles, física de neutrinos y materia oscura
Title:	Electroweak interactions, neutrino physics and dark matter
Tutor/es:	Óscar Moreno Díaz
E-mail tutor/es:	osmoreno@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Dependiendo de los intereses del estudiante, algunos de los posibles objetivos del trabajo en cuanto a la temática son:

- Introducción a la interacción electrodébil y a los fenómenos asociados: desintegraciones beta simple y doble, dispersión de leptones por núcleos y factores electromagnéticos nucleares, observables de violación de paridad, etc.
- Introducción a la física de neutrinos: matriz de mezcla, oscilaciones en vacío, conversión adiabática en materia, neutrinos estériles, modelos de interacción con núcleos.
- Introducción a las evidencias de materia oscura y estudio de posibles candidatos que presenten interacciones de tipo débil.

Los objetivos procedimentales básicos son:

- Búsqueda y consulta de referencias especializadas.
- Realización de cálculos analíticos o numéricos para reproducir algunos de los resultados conocidos o para predecir otros casos.
- Elaboración de una memoria escrita del trabajo realizado, con la estructura y estilo requeridos en un documento científico: estilo de redacción, formato de expresiones matemáticas, representación gráfica de resultados, citas bibliográficas, etc.
- Preparación de la presentación oral del tema tanto en sus aspectos técnicos como con carácter divulgativo.

Metodología:

En primer lugar, el estudiante se familiarizará con la teoría de la interacción electrodébil general a partir de libros de texto de física de partículas y de física nuclear. A continuación, elegirá algún fenómeno concreto relacionado con esa interacción de los que se citan en el apartado anterior, y profundizará en él a través de libros especializados y artículos científicos.

Dependiendo de la orientación elegida por el estudiante, se podrán realizar cálculos analíticos o numéricos, analizarlos y representarlos gráficamente.

Finalmente, se elaborará una memoria escrita y una presentación oral que constarán de un resumen, una introducción teórica concisa redactada según la comprensión del tema alcanzada por el estudiante, una explicación de los cálculos o análisis realizados, las principales conclusiones y una lista de las referencias consultadas.

Bibliografía:

Libros de texto:

- W. S. C. Williams, Nuclear and Particle Physics, Oxford University Press.
- K. Krane, Introductory Nuclear Physics, Wiley.
- T. W. Donnelly, J. A. Formaggio, B. R. Holstein, R. G. Milner, B. Surrow, Foundations of Nuclear and Particle Physics, Cambridge University Press.
- C. Burgess, G. Moore, The Standard Model: A primer, Cambridge University Press.
- D. Griffiths, Introduction to Elementary Particles, Wiley.
- F. Halzen, A. D. Martin, Quarks and Leptons, Wiley.
- K. Grotz, H. V. Klapdor, The Weak Interaction in Nuclear, Particle and Astrophysics, Adam Hilger.
- F. Boehm, P. Vogel, Physics of Massive Neutrinos, Cambridge University Press.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Tendencias actuales en radioterapia avanzada
Title:	Current trends in advanced radiotherapy
Tutor/es:	Paula Ibáñez García, José Manuel Udías Moinelo
E-mail tutor/es:	pbibanez@ucm.es, jmudiasm@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Realizar una revisión del estado del arte en radioterapia: hadronterapia, aceleradores de electrones de alta energía, dispositivos con capacidad FLASH (ultra alta tasa de dosis). Se complementará con simulaciones ilustrando las ventajas de algunas de las nuevas tecnologías frente a los sistemas convencionales con fotones y electrones de menos de 25 MV de energía.

Metodología:

1. Introducción a la radioterapia: estudio y revisión del material sobre interacción de la radiación con materiales biológicos, parámetros más importantes (poder de frenado, LET, dosis, kerma)
2. Revisión bibliográfica sobre hadronterapia, el efecto FLASH y los aceleradores de electrones y protones de alta tasa, y la irradiación con electrones de alta energía (>100 MeV). Cada alumno se centrará en una técnica diferente.
3. Aprendizaje de herramientas de simulación.
4. Participación en actividades formativas específicas para los trabajos de fin de grado, directrices para la elaboración del trabajo y de la presentación, asistencia a seminarios del Grupo de Física Nuclear (GFN).
5. Presentación del TFG en los seminarios del GFN, previa a su defensa.

Bibliografía:

“Fundamentos de Física Médica (V3 y V4, Radioterapia). Sociedad Española de Física Médica” , Antonio Brosed Editor.

· “The Physics of Radiation Therapy” F.M. Khan Eds. Lip. Williams and Wilkins, 2003.

· <http://nuclear.fis.ucm.es>



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Hadronterapia
Title:	Hadrontherapy
Tutor/es:	Paula Beatriz Ibáñez García, José Antonio Briz Monago
E-mail tutor/es:	pbibanez@ucm.es, josebriz@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

El trabajo se centra el estudio de la interacción de hadrones con materiales y con tejidos vivos, con el objetivo de analizar las incertidumbres asociadas al rango de los protones desde el punto de vista físico.

Se pretende hacer un estudio cuantitativo con suficiente detalle para determinar la sensibilidad al rango de los protones de diversos métodos de detección de radiación secundaria, identificar posibles mejoras y plantear su implementación en sistemas realistas.

Se ofertan dos plazas en las que se explorarán técnicas diferentes.

Metodología:

1. Estudio bibliográfico sobre la física de la protonterapia, la interacción de partículas cargadas en medios biológicos, y los aspectos relevantes de la determinación del rango de los protones y la planificación clínica.
2. Familiarización con los aspectos más relevantes de las técnicas experimentales de detección rayos gamma, y métodos de verificación de rango en hadronterapia.
3. Participación en actividades formativas específicas para los trabajos de fin de grado, directrices para la elaboración del trabajo y de la presentación.
4. Participación en estudios del grupo de física nuclear en hadronterapia.
5. Desarrollo del tema de estudio, redacción y revisión del trabajo.
6. Exposición de los trabajos previa a la presentación y defensa oficiales.

Bibliografía:

- Wilson, Radiology, vol. 47 (1946) 487-491
- Schardt et al., Reviews of modern physics 82(2010) 383-425
- Paganetti, "Proton therapy physics", 2nd edition, CRC Press, 2019
- España et al., Phys. Med. Biol. 56 (2011) 2687–2698
- TOPAS Tool for particle simulation, <https://www.topasmc.org>
- Krane, "Introductory Nuclear Physics", Wiley.
- Leo, WF, "Techniques for nuclear and particle physics experiments" 1987 Springer



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Terapia con radiofármacos
Title:	RadioPharmaceutical Therapy
Tutor/es:	Victor Moya Zamanillo, José Luis Contreras González
E-mail tutor/es:	victmoya@ucm.es , joseluco@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

La Medicina Nuclear (MN) en su vertiente terapéutica usa radiofármacos para tratar dolencias, normalmente oncológicas. Muchas veces se combina con otros diagnósticos en lo que se conoce como Teranóstica. Los objetivos del TFG son:

- 1- Entender y describir las técnicas de Terapia y diagnóstico en MN
- 2- Estimar mediante simulaciones sencillas la dosis depositada por un radiofármaco.

Metodología:

Para la parte de revisión se proporcionará bibliografía tanto sobre la técnica como los radiofármacos y el estudiante tendrá reuniones semanales con los tutores para seguir el avance en el trabajo. Para las simulaciones se usarán programas desarrollados por el Grupo de Altas Energías (GAE).

Bibliografía:

Physics in Nuclear Medicine, 4e (Saunders W.B.) Tapa dura - 17 abril 2012. S. Cherry, J.A: Sorenson, M.E: Phelps.

Future of Theranostics: An Outlook on Precision Oncology in Nuclear Medicine. Journal of Nuclear Medicine September 2019, 60 (Supplement 2)



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	La Física en la Medicina Nuclear
Title:	Physics in Nuclear Medicine
Tutor/es:	José Luis Contreras González
E-mail tutor/es:	joseluco@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

La Medicina Nuclear (MN) es uno de los campos de más directa aplicación de la Física en Medicina. Se usan fármacos que incluyen un radioisótopo para diagnosticar o tratar dolencias. En el caso del diagnóstico la radiación emitida se detecta con instrumentación especializada. En la terapia se usan simulaciones de la interacción de la radiación con los tejidos y órganos. El análisis de los datos exige técnicas especiales. Todas estas herramientas y técnicas involucran el trabajo de físicos. Los objetivos de este trabajo son:

- 1- Escoger un tema de Física relacionado con la Medicina Nuclear
- 2- Entender el tema y explicar sus bases y el estado del arte en él.
- 3- Opcionalmente, realizar trabajo práctico relacionado con el tema, simulaciones, análisis de datos o medidas.

Metodología:

Se escogerá de común acuerdo entre alumno y profesor un tema concreto dentro del campo propuesto, por ejemplo sobre detectores, radioisótopos, técnicas de imagen, técnicas de dosimetría, etc.

Para la parte de revisión se proporcionará bibliografía básica. Para la aplicación práctica se podrán usar los ordenadores y laboratorios del departamento, así como el software desarrollado en él. El/la estudiante tendrá reuniones semanales con el tutor para seguir el avance en el trabajo.

Bibliografía:

Physics in Nuclear Medicine, 4e (Saunders W.B.) Tapa dura - 17 abril 2012. S. Cherry, J.A: Sorenson, M.E: Phelps.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Caracterización de la progresión del Alzheimer mediante conectividad funcional en MEG
Title:	Characterization of Alzheimer's disease progression through functional connectivity in MEG
Tutor/es:	Gianluca Susi
E-mail tutor/es:	gsusi@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

La enfermedad de Alzheimer (EA) es un trastorno neurodegenerativo progresivo caracterizado por deterioro cognitivo y pérdida de memoria. La comprensión de los mecanismos subyacentes ha avanzado notablemente gracias al desarrollo de técnicas de neuroimagen funcional.

La combinación excepcional de resolución espacial y temporal que ofrece la magnetoencefalografía (MEG), junto con su carácter no invasivo, permite que el análisis de la actividad cerebral basado en MEG revele patrones distintivos de alteraciones neurofisiológicas a lo largo de la progresión de la EA.

La conectividad funcional (CF) hace referencia a la sincronización estadística entre distintas regiones del cerebro [1], y su análisis permite identificar patrones anómalos de comunicación neuronal, los cuales pueden reflejar procesos patológicos en etapas tempranas de la EA.

Este trabajo propone analizar y comparar la CF a partir de datos MEG de 40 pacientes en etapas temprana de la EA y 40 sujetos sanos de control, pareados por edad y sexo. Para ello, se utilizarán datos reales adquiridos previamente en el Centro de Neurociencia Cognitiva y Computacional (C3N) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), y se implementarán distintos índices de CF, agrupados en dos enfoques principales:

- Índices basados en la fase (phase-based): como el Phase Locking Value (PLV) [2] y el Phase Lag Index (PLI) [3];
- Índices basados en la envolvente (envelope-based): como la Amplitude Envelope Correlation (AEC) [4] y su versión ortogonalizada (es decir, insensible a la conectividad espuria de tipo "zero-lag").

Metodología:

- Revisión bibliográfica sobre índices de actividad funcional basados en la fase y en la envolvente.
- El estudiante 1 se ocupará de la implementación de los índices PLV, PLI,
- El estudiante 2 se ocupará de la implementación de los índices AEC y AEC ortogonalizada
- Aplicación de los dos tipos de índices a los datos MEG de los dos grupos diagnosticos
- Comparación de los resultados obtenidos, considerando las diferentes clases diagnosticas y los diferentes tipos de índices.

Bibliografía:

- [1] - Colclough GL, Woolrich MW, Tewarie PK, Brookes MJ, Quinn AJ, Smith SM. How reliable are MEG resting-state connectivity metrics? *Neuroimage*. 2016 Sep;138:284-293.
- [2] - Lachaux JP, Rodriguez E, Martinerie J, Varela FJ. Measuring phase synchrony in brain signals. *Hum Brain Mapp*. 1999;8(4):194-208.
- [3] - Stam CJ, Nolte G, Daffertshofer A. Phase lag index: assessment of functional connectivity from multi channel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Hum Brain Mapp*. 2007 Nov;28(11):1178-93.
- [4] - Brookes MJ, Hale JR, Zumer JM, Stevenson CM, Francis ST, Barnes GR, Owen JP, Morris PG, Nagarajan SS. Measuring functional connectivity using MEG: methodology and comparison with fMRI. *Neuroimage*. 2011 Jun 1;56(3):1082-104.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	El isospín nuclear y verificación de la hipótesis CVC en desintegraciones beta
Title:	Nuclear isospin and CVC verification in beta decay
Tutor/es:	José Manuel Udías Moinelo
E-mail tutor/es:	jmudiasm@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Presentar la hipótesis CVC (corrientes vectoriales conservadas) y su verificación en la interacción débil.

-Obtener los valores de la constante de Fermi a partir de los $\log ft$ experimentales en transiciones superpermitidas, estimando su barra de error.

-Entender el papel de la simetría de isospín nuclear, y las transiciones betas entre estados análogos, en la verificación de la hipótesis CVC.

-Calcular o estimar las desviaciones sobre la hipótesis CVC debidas a las violaciones de la simetría de isospín debidas a la interacción coulombiana.

Metodología:

Se buscarán las transiciones superpermitidas y sus valores de Q y $\log ft$, tal y como aparecen en la tabla 9.2 del Krane, pero con datos recientes de las tablas de isótopos. Se calculará o localizará la integral de Fermi f (Z', E). Se representarán los esquemas de niveles del núcleo padre e hijo en casos típicos. Justificará por qué la parte nuclear del elemento de matriz vale $\sqrt{2}$. Se obtendrá el valor de la constante g para estas transiciones entre estados análogos. Se calculará las desviaciones sobre el valor máximo del elemento de matriz nuclear en las transiciones super-permitidas debidas a la violación de isoespín introducidas por la interacción coulombiana.

Bibliografía:

K.S. Krane, 'Introductory Nuclear Physics' (1988). Pgs. 277 a 295.
Valores de Q , semividas y $\log ft$: <http://www.nndc.bnl.gov/>
Greiner, Müller 'Gauge Theory of Weak Interactions', Springer-Verlag
E. Lehderer y C. Shirley, 'Table of Isotopes'
Review of Particle Properties, <http://pdg.lbl.gov>



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica
Título:	Conectividad efectiva en datos de electroencefalografía (EEG) y magnetoencefalografía (MEG)
Title:	Effective connectivity indices in electroencephalography (EEG) magnetoencephalography (MEG) data
Tutor/es:	Gianluca Susi
E-mail tutor/es:	gsusi@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

La combinación de resolución espacial y temporal que ofrecen las técnicas de electroencefalografía (EEG) y magnetoencefalografía (MEG), junto con su carácter no invasivo, permite que el análisis de la actividad cerebral basado en dichas técnicas revele patrones distintivos de alteraciones neurofisiológicas en diversas enfermedades neurológicas.

En particular, el estudio de la conectividad funcional (CE) cerebral, definida como la influencia causal que una región cerebral ejerce sobre otra, permite identificar direccionalidad y dinámica en la interacción neuronal, herramienta poderosa para caracterizar distintas clases diagnósticas, especialmente en el contexto de enfermedades neurológicas o psiquiátricas.

Este trabajo tiene como objetivo analizar y comparar la CE a partir de datos M/EEG de pacientes pertenecientes a diferentes clases diagnósticas, pareados por edad y sexo. Para ello, se emplearán datos reales previamente adquiridos en el Centro de Neurociencia Cognitiva y Computacional (C3N) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), y se implementarán distintos índices de CE:

- Causalidad de Granger (CG) [1]
- Entropía de transferencia (ET) [2].

Metodología:

- Revisión bibliográfica sobre índices de conectividad efectiva aplicados a EEG y MEG.
- Implementación de los índices CG y ET.
- Aplicación de los índices a los datos EEG y MEG.
- Comparación de los resultados obtenidos, considerando las diferentes clases diagnósticas y los diferentes tipos de índices.

Bibliografía:

[1] - Granger CWJ. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*. 1969; 37:424–38

[2] - Vicente R, Wibral M, Lindner M, Pipa G. Transfer entropy: a model-free measure of effective connectivity for the neurosciences. *J Comput Neurosci*. 2011 Feb; 30(1):45-67.