

Revisión

Terapia de partículas en el tratamiento oncológico: un avance paradigmático en radioterapia

Particle Therapy in Cancer Treatment: A Paradigm-Shifting Advancement in Radiotherapy

Brigitte Peiger  Carola Lütgendorf-Caucig 

Resumen

La terapia de partículas representa uno de los avances más significativos en la oncología moderna, al ofrecer una alternativa altamente precisa para el tratamiento de tumores complejos. A diferencia de la radioterapia convencional, esta modalidad utiliza protones e iones pesados principalmente carbono cuya dosimetría se beneficia del pico de Bragg, permitiendo depositar dosis ablativas en el tumor con mínima irradiación a tejidos sanos. Este enfoque ha demostrado superioridad en tumores localizados cerca de estructuras radiosensibles y en neoplasias radioresistentes, con mejoras sustanciales en la toxicidad aguda y tardía. Centros como MedAustron y CNAO han consolidado su aplicación clínica, evidenciando beneficios en pacientes pediátricos y adultos, así como en escenarios de re-irradiación. Aunque se investigan nuevas partículas como el helio, persisten desafíos relacionados con el acceso limitado y la necesidad de mayor evidencia comparativa. En conjunto, la terapia de partículas amplía las opciones terapéuticas y fortalece el horizonte de la oncología de precisión.

Palabras claves: Terapia de partículas; Protonterapia; Iones de carbono; Pico de Bragg; Radioterapia; Oncología de precisión; Tumores radioresistentes.

Abstract

Particle therapy constitutes a major advance in contemporary oncology by enabling highly precise radiation delivery using protons and carbon ions. Unlike conventional radiotherapy, its physical advantages particularly the Bragg peak allow maximal dose deposition within the tumor while significantly reducing exposure to surrounding healthy tissues. This improves local control and decreases acute and late toxicities, especially in tumors near critical structures or with marked radio resistance. Clinical experience in specialized centers, such as MedAustron and CNAO, has shown favorable outcomes in pediatric and adult populations, including cases requiring re-irradiation. Emerging modalities such as helium ion therapy may offer intermediate radiobiological benefits, though further clinical validation is needed. Persistent challenges include limited availability worldwide and the need for stronger comparative evidence. Overall, particle therapy broadens therapeutic possibilities and strengthens the future of precision oncology.

Keywords: Particle therapy; Proton therapy; Carbon ions; Bragg peak; Radiotherapy; Precision oncology; Radioresistant tumors.

Introducción: El cáncer es una enfermedad caracterizada por la proliferación descontrolada y desorganizada de células que evaden los mecanismos fisiológicos normales que regulan el crecimiento celular. Esta capacidad permite la invasión local y la diseminación a órganos y tejidos adyacentes, lo que dificulta su manejo terapéutico. Considerando la heterogeneidad de más de cien subtipos tumorales, cada uno con un comportamiento biológico y respuesta terapéutica diferencial, es imprescindible contar con métodos diagnósticos precisos y estrategias terapéuticas individualizadas. (1-4)

El abordaje oncológico es multifactorial, tradicionalmente sustentado en la cirugía, la quimioterapia y la radioterapia. No obstante, a pesar de los avances significativos en estas modalidades, persisten limitaciones relacionadas con su disponibilidad global y sus perfiles de toxicidad y especificidad. (4,5)

En este contexto, la terapia de partículas ha emergido como una modalidad innovadora dentro del ámbito de la radioterapia, utilizando partículas cargadas, principalmente protones e iones de carbono, para administrar dosis de radiación con elevada precisión. Esta técnica ha demostrado beneficios clínicos significativos, especialmente en la irradiación de tumores localizados próximos a órganos de alta radiosensibilidad o que requieren dosis ablativas no factibles mediante radioterapia convencional sin incurrir en toxicidad excesiva. (5,6)

La superioridad de la terapia de partículas reside en el fenómeno físico del pico de Bragg, que permite la liberación máxima de dosis en un punto específico del tejido tumoral, minimizando la exposición y el daño en tejidos sanos circundantes. Esta dosimetría optimizada contribuye a una reducción sustancial de los efectos adversos asociados a la radioterapia tradicional. (7,8)

El centro MedAustron GmbH, ubicado en Austria, se ha consolidado como un referente en Europa para la implementación clínica de esta tecnología desde 2016, mediante el uso del acelerador MAPTA (MedAustron Particle Therapy Accelerator). Esta infraestructura posibilita la aplicación de protonterapia y terapia con iones de carbono, ajustando el protocolo terapéutico según las características específicas del paciente y la indicación clínica, ya sea como tratamiento primario o en combinación con cirugía y terapias sistémicas. (9-11)

La capacidad de MAPTA para administrar dosis altamente conformadas permite tratar lesiones tumorales en regiones anatómicas complejas, cercanas a estructuras radiosensibles y en tumores con alta resistencia radiobiológica, tales como neoplasias de cabeza y cuello o médula ósea, escenarios en los que la radioterapia convencional presenta limitaciones significativas. Además, MedAustron impulsa programas de investigación en modelos biológicos y tecnologías avanzadas de imagen para optimizar la seguridad y eficacia terapéutica. (11,12)

La protonterapia ha mostrado eficacia en pacientes pediátricos y adultos con neoplasias en localizaciones como cabeza y cuello, cerebro, pulmón, hígado, mama y próstata. Su perfil de toxicidad reducido se asocia con mejor calidad de vida, particularmente en la población pediátrica, que es especialmente susceptible a las secuelas tardías de la irradiación. Los datos clínicos avalan tasas favorables de control tumoral local y supervivencia, consolidando su papel en la práctica clínica. (7,13,14)

Por su parte, la terapia con iones de carbono (CIRT) ofrece ventajas radiobiológicas superiores, incluyendo una mayor efectividad biológica relativa, que permite abordar tumores radioresistentes y mejorar el control local. Esta modalidad es especialmente útil en lesiones adyacentes a tejidos críticos, como el nervio óptico o estructuras cerebrales delicadas. La experiencia clínica, por ejemplo, en el Centro Nacional de Terapia con Iones de Carbono (CNAO), ha evidenciado resultados prometedores en términos de control tumoral, reducción de toxicidad y buena tolerancia, incluso en contextos de re-irradiación o tratamientos combinados. (15-17)

Además de protones e iones de carbono, existe interés creciente en el desarrollo y evaluación clínica de la terapia con iones de helio, que podrían ofrecer un perfil físico y biológico intermedio, optimizando la relación beneficio-riesgo al reducir daño colateral y mejorar el control tumoral. Sin embargo, esta modalidad requiere investigación adicional y validación clínica para su aplicación generalizada. (18,19)

No obstante, la terapia de partículas aún enfrenta desafíos importantes, entre ellos la limitada disponibilidad a nivel mundial y la necesidad de robustecer la evidencia clínica mediante estudios prospectivos y ensayos aleatorizados que comparen su eficacia y seguridad con tratamientos convencionales. Actualmente, existen centros especializados en Japón, Europa y Estados Unidos, pero el acceso sigue siendo restringido en muchas regiones.

En conclusión, la terapia de partículas constituye un avance trascendental en el tratamiento oncológico. Su capacidad para administrar dosis ablativas con alta precisión y menor toxicidad amplía las opciones terapéuticas, especialmente en tumores radioresistentes o ubicados en proximidad a órganos críticos. Los centros especializados continúan desarrollando y perfeccionando estas tecnologías, con el objetivo de ampliar su indicación clínica y mejorar los desenlaces en pacientes con cáncer a nivel global.

Declaración de intereses:

El autor trabaja actualmente en MedAustron mencionado en este texto. Esta declaración se hace en aras de la transparencia. Las opiniones expresadas son personales y no representan necesariamente la posición oficial de dicha institución.

Detalles de las autoras:

¹ MedAustron Center for Ion Therapy, Marie-Curie Strasse 5, Wiener Neustadt 2700, Austria

Referencias

1. Cooperberg MR, Cowan J, Broering JM, Carroll PR. High-risk prostate cancer in the United States, 1990-2007. *World J Urol.* 2008 Jun;26(3):211-8.
2. Debelo DT, Muzazu SG, Heraro KD, Ndalama MT, Mesele BW, Haile DC, et al. New approaches and procedures for cancer treatment: Current perspectives. *SAGE Open Med.* 2021 Aug 12;9:20503121211034370.
3. Randi G, Zaro F, Carvalho RN, Martos C, Dimitrova N, Dyba T, et al. The European Cancer Information System (ECIS) web application.
4. Giusti F, Martos C, Trama A, Bettio M, Sanvisens A, Audisio R, et al. Cancer treatment data available in European cancer registries: Where are we and where are we going? *Front Oncol.* 2023 Feb 8;13:1109978.
5. Kato S, Ohno T, Tsujii H, Nakano T, Mizoe JE, Kamada T, et al. Dose escalation study of carbon ion radiotherapy for locally advanced carcinoma of the uterine cervix. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2006 Jun 1;65(2):388-97.
6. Grau C, Dasu A, Troost EGC, Haustermans K, Weber DC, Langendijk JA, et al. Towards a European prospective data registry for particle therapy. *Radiother Oncol.* 2024 Jul;196:110293.
7. Matsumoto Y, Fukumitsu N, Ishikawa H, Nakai K, Sakurai H. A Critical Review of Radiation Therapy: From Particle Beam Therapy (Proton, Carbon, and BNCT) to Beyond. *J Pers Med.* 2021 Aug 23;11(8):825.
8. Zschaek S, Falk M, Löck S, Troost E, Stützer K, Wohlfahrt P, et al. PRONTOX - proton therapy to reduce acute normal tissue toxicity in locally advanced non-small-cell lung carcinomas (NSCLC): Study protocol for a randomised controlled trial. *Trials.* 2016 Nov 15;17.
9. Wilson JS, Main C, Thorp N, Taylor RE, Majothi S, Kearns PR, et al. The effectiveness and safety of proton beam radiation therapy in children and young adults with Central Nervous System (CNS) tumours: a systematic review. *J Neurooncol.* 2024 Mar;167(1):1-34.
10. Stock M, Georg P, Mayer R, Böhlen TT, Vatnitsky S. Development of Clinical Programs for Carbon Ion Beam Therapy at MedAustron. *Int J Part Ther.* 2016;2(3):474-7.
11. Penescu LC, Landscapes A. The Beam Quality Assurance of the MedAustron Particle Therapy Accelerator. 2017;
12. Pivi MTF, Franco AD, Farinon F, Kronberger M, Kurfuerst C, Kurfürst C, et al. Overview and Status of the MedAustron Ion Therapy Center Accelerator. 2017;
13. Breen WG, Geno CS, Waddle MR, Qian J, Harmsen WS, Burns TC, et al. Proton versus photon craniospinal irradiation for adult medulloblastoma: A dosimetric, toxicity, and exploratory cost analysis. *Neurooncol Adv.* 2024 Dec;6(1):vdae034.
14. Kiseleva V, Gordon K, Vishnyakova P, Gantsova E, Elchaninov A, Fatkhudinov T. Particle Therapy: Clinical Applications and Biological Effects. *Life (Basel).* 2022 Dec 9;12(12):2071.
15. Orlandi E, Barcellini A, Vischioni B, Fiore MR, Vitolo V, Iannalfi A, et al. The Role of Carbon Ion Therapy in the Changing Oncology Landscape—A Narrative Review of the Literature and the Decade of Carbon Ion Experience at the Italian National Center for Oncological Hadrontherapy. *Cancers (Basel).* 2023 Oct 20;15(20):5068.
16. Koosha F, Ahmadikamalabadi M, Mohammadi M. Review of Recent Improvements in Carbon Ion Radiation Therapy in the Treatment of Glioblastoma. *Advances in Radiation Oncology [Internet].* 2024 May 1 [cited 2025 Apr 22];9(5). Available from: [https://www.advancesradonc.org/article/S2452-1094\(24\)00028-9/fulltext](https://www.advancesradonc.org/article/S2452-1094(24)00028-9/fulltext)
17. Hrbacek J, Kacperek A, Beenakker JWM, Mortimer L, Denker A, Mazal A, et al. PTCOG Ocular Statement: Expert Summary of Current Practices and Future Developments in Ocular Proton Therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2024 Dec 1;120(5):1307-25.
18. Mairani A, Mein S, Blakely E, Debus J, Durante M, Ferrari A, et al. Roadmap: helium ion therapy. *Phys Med Biol.* 2022 Aug 5;67(15).
19. Wickert R, Tessonier T, Deng M, Adeberg S, Seidensaal K, Hoeltgen L, et al. Radiotherapy with Helium Ions Has the Potential to Improve Both Endocrine and Neurocognitive Outcome in Pediatric Patients with Ependymoma. *Cancers (Basel).* 2022 Nov 28;14(23):5865.