



## Praca poglądowa/Review paper

# HyperArc jako nowoczesna metoda radiochirurgii stereotaktycznej leczenia zmian wewnątrzczaszkowych

## *HyperArc as a modern method of stereotactic radiosurgery for the treatment of intracranial cases*

Weronika Kiejska<sup>1</sup>, Kinga Graczyk<sup>1</sup>, Agnieszka Skrobała<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Zakład Fizyki Medycznej, Wielkopolskie Centrum Onkologii

<sup>2</sup>Katedra i Zakład Elektroradiologii, Uniwersytet Medyczny, Poznań

---

### Streszczenie

Radiochirurgia stereotaktyczna pojedynczej frakcji SRS (ang. Stereotactic radiosurgery) jest powszechnie stosowana do leczenia nowotworów mózgu oraz przerzutów umiejscowionych wewnątrzczaszkowo. Wykorzystuje ona promieniowanie jonizujące o wysokiej dawce, oszczędzając przy tym zdrowe tkanki. Celem pracy było przedstawienie nowoczesnej techniki stereotaktycznej HyperArc realizowanej na klasycznym akceleratorze liniowym z wykorzystaniem kolimatora wielolistkowego MLC (ang. Multileaf collimator). HyperArc to szczególny rodzaj techniki łukowej z modulowanym natężeniem VMAT (ang. Volumetric modulated arc therapy) będący alternatywnym rozwiązaniem dla zrobotyzowanej radiochirurgii stereotaktycznej SRS. Umożliwia stosowanie techniki izocentrycznej do jednoczesnego napromieniania wielu guzów w obszarze mózgowia na klasycznym akceleratorze liniowym z wielolistkowym kolimatorem MLC, a także pozwala na zadawanie różnych wartości dawki dla poszczególnych guzów w jednym planie leczenia. Dzięki optymalizacji unikamy wysokiej dawki w zdrowej tkance oraz pomiędzy objętościami docelowymi. W porównaniu z innymi technikami stereotaktycznymi umożliwia znacznie krótszy czas napromieniania, podobny do czasu leczenia w technikach dynamicznych VMAT czy z modulowanym natężeniem IMRT (ang. Intensity modulated radiation therapy).

### Abstract

Single-fraction SRS stereotactic radiosurgery is commonly used for brain tumors and intracranial metastases. It uses high-dose ionizing radiation while sparing healthy tissues. The aim of this study was to

---

Adres do korespondencji

Weronika Kiejska

Zakład Fizyki Medycznej,

Wielkopolskie Centrum Onkologii, ul. Garbary 15, 61-866 Poznań, Polska

e-mail: [veronika.kiejska@wco.pl](mailto:veronika.kiejska@wco.pl)

present and analyze the modern HyperArc stereotactic technique implemented on a classic linear accelerator with an MLC multileaf collimator. HyperArc is a special type of VMAT (Volumetric modulated arc therapy) technique that is an alternative solution to stereotactic radiosurgery (SRS). It enables the use of the isocentric technique for the simultaneous irradiation of many tumors in the brain area on a classic linear accelerator with a multileaf MLC collimator and also allows you to set different dose values for individual tumors in one treatment plan. Through optimization, we avoid high doses in healthy tissue and between target volumes. Compared to other stereotactic techniques, it enables a much shorter irradiation time, similar to the treatment time in dynamic VMAT or IMRT Intensity modulated radiation therapy) techniques.

**Słowa kluczowe:** radiochirurgia stereotaktyczna, HyperArc, palnowanie leczenia

**Keywords:** stereotatic radiosurgery, HyperArc, treatment planning

---

## Wstęp

Nowotwory płuc, piersi, czerniak, przewodu pokarmowego są nowotworami, które z reguły dają przerzuty do mózgu [1,2]. Guzy przerzutowe do mózgu zaliczają się do jednych z najczęstszych nowotworów wewnątrzczaszkowych. Występują one u około 40% pacjentów, którzy chorują na nowotwory ogólnoustrojowe [3]. Radioterapia pacjentów z guzami przerzutowymi we wcześniejszych latach opierała się na radioterapii całego mózgu WBRT (ang. whole brain radiotherapy). Jednak w ostatnich latach na znaczeniu zyskały: radiochirurgia stereotaktyczna, czyli dostarczenie wysokiej dawki promieniowania w pojedynczej frakcji (SRS, stereotactic radiosurgery) oraz radioterapia stereotaktyczna (SRT, stereotactic radiotherapy), polegająca na dostarczeniu wysokiej dawki w 3 do 5 frakcjach [4,5]. Radiochirurgia jest przeprowadzana przeważnie u pacjentów, u których guz nowotworowy nie przekracza średnicy 4 cm, jest dobrze widoczny na przekrojach rezonansu magnetycznego. Są to tak naprawdę nieliczne ograniczenia w stosunku do korzyści jakie za sobą niesie radiochirurgia stereotaktyczna. Daje ona możliwość leczenia małych zmian nie napromieniając przy tym całego mózgu, jest mało inwazyjna, co pozwala na szybką rekonwalescencję. Ponadto nie wymaga hospitalizacji pacjenta i przede wszystkim zapewnia leczenie wielu zmian w trakcie jednego zabiegu napromieniania [6].

Dostarczenie wysokiej dawki promieniowania do guza w radiochirurgii stereotaktycznej może odbywać się z wykorzystaniem stereotaktycznego zrobotyzowanego systemu radiochirurgii CyberKnife oraz za pomocą klasycznego akceleratora liniowego z użyciem kolimatora wielolistkowego (MLC, multileaf collimator), znajdującego się w głowicy aparatu terapeutycznego. Daje on możliwość dopasowania kształtu wiązki promieniowania do kształtu napromienianej zmiany poprzez odpowiednie ustawienie MLC, które poruszają się niezależnie od siebie [7]. Szczególnym rodzajem techniki łukowej z modulowanym natężeniem (VMAT, volumetric modulated arc therapy), który jest rozwiązaniem radiochirurgii stereotaktycznej jest technika HyperArc. Technika HyperArc umożliwia zastosowanie techniki izocentrycznej do jednoczesnego napromieniania wielu zmian w obszarze mózgowia na klasycznym akceleratorze liniowym z kolimatorem MLC.

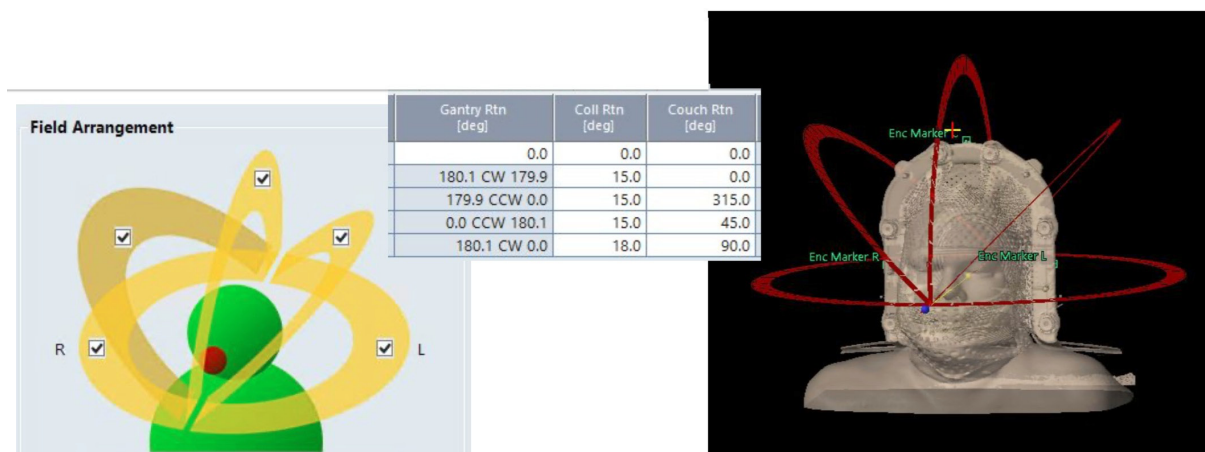
Celem pracy było przedstawienie nowoczesnej techniki stereotaktycznej HyperArc realizowanej na klasycznym akceleratorze liniowym z kolimatorem wielolistkowym MLC.

## Technika HyperArc

Technika VMAT, w której stosuje się wiązki o zmiennym kształcie oraz zmiennej mocy dawki, zapewnia napromienianie na akceleratorze liniowym, którego głowica stale obraca się wokół pacjenta. Każdy obrót nazywany jest łukiem. Ponadto ilość promieniowania dostarczanego na każdą sekundę i szybkość obracania się łuku są również zoptymalizowane w celu uzyskania wysoce konformalnych rozkładów dawki. Promieniowanie jest dostarczane do objętości planowanej objętości leczonej (PTV, planning target volume) minimalizując przy tym dostarczenie promieniowania jonizującego do otaczających zdrowych tkanek [8].

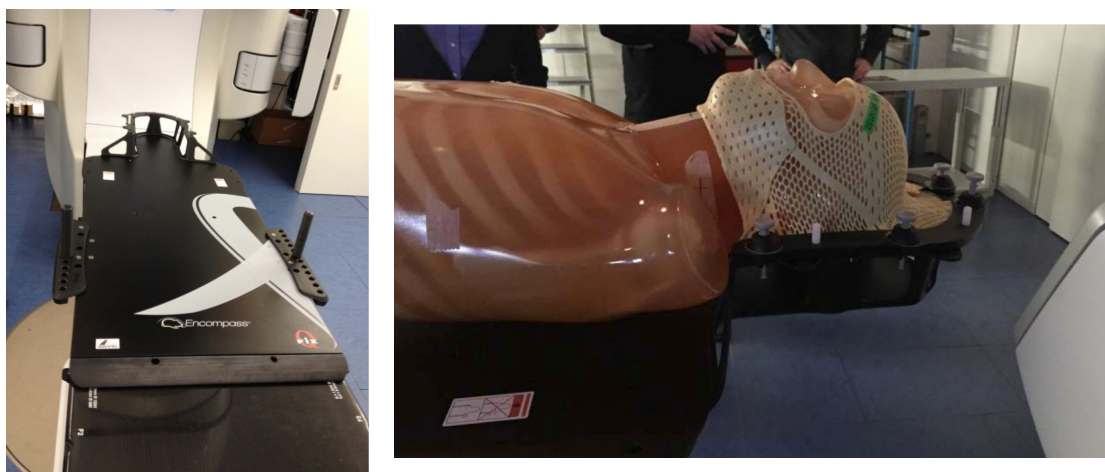
HyperArc to szczególny rodzaj techniki VMAT będący alternatywnym rozwiązaniem dla radiochirurgii

stereotaktycznej (SRS). Umożliwia stosowanie techniki izocentrycznej do jednoczesnego napromieniania wielu guzów w obszarze mózgowia na klasycznym akceleratorze liniowym z wielolistkowym kolimatorem, a także pozwala na zadawanie różnych wartości dawki dla poszczególnych guzów w jednym planie leczenia. Planowanie leczenia techniką HyperArc opiera się na wykorzystaniu optymalizacji rozkładu dawki w technice VMAT. Oznacza to skrócenie czasu napromieniania w stosunku do wielopolowej techniki IMRT, zniwelowanie promieniowania rozproszonego w obszarze mózgowia, chroniąc jednocześnie narządy krytyczne. Technika HyperArc umożliwia automatyczny wybór optymalnego punktu izocentrum, automatyczny dobór zakresu i liczby łuków promieniowania i automatyczny optymalny dobór kąta kolimatora. W technice HyperArc możliwe jest 5 predefiniowanych łuków (ryc.1): 1/ pełen łuk  $0^\circ - 360^\circ$  współpłaszczyznowy z obrotem stołu  $0^\circ$  (możliwość podziału na 2 półłuki; 1 półłuk  $0^\circ - 179,9^\circ$ ; 1 półłuk  $180,1^\circ - 0^\circ$ ), 2/ półłuk  $0^\circ - 180^\circ$  lub  $180^\circ - 0^\circ$  niewspółpłaszczyznowy z obrotem stołu  $0^\circ$ , 3/ półłuk  $0^\circ - 180^\circ$  lub  $180^\circ - 0^\circ$  niewspółpłaszczyznowy z obrotem stołu  $90^\circ$  lub  $270^\circ$ , 4/ półłuk  $0^\circ - 180^\circ$  lub  $180^\circ - 0^\circ$  niewspółpłaszczyznowy z obrotem stołu  $45^\circ$ , 5/ półłuk  $0^\circ - 180^\circ$  lub  $180^\circ - 0^\circ$  niewspółpłaszczyznowy z obrotem stołu  $315^\circ$  [4].



Rycina 1. Wizualizacja automatycznego wyboru liczby łuków i kąta obrotu kolimatora w systemie planowania leczenia [13]

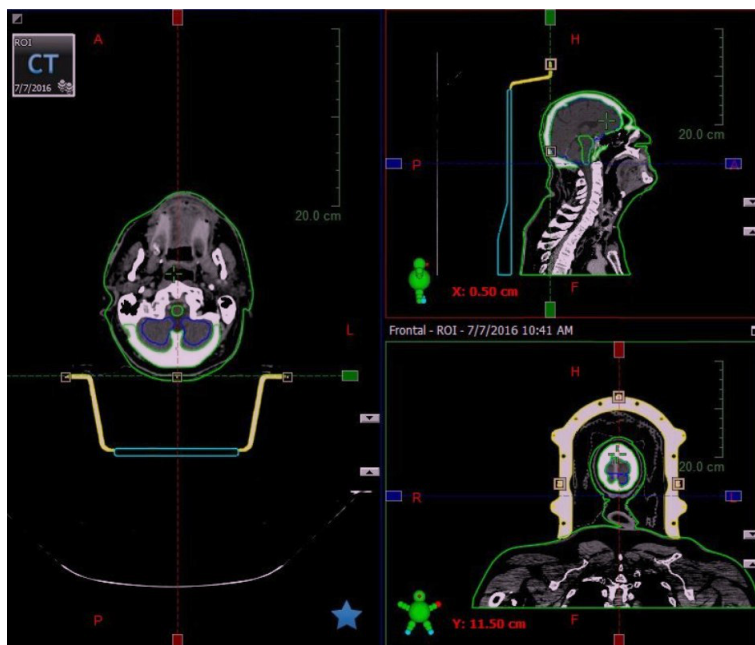
Aby leczenie było efektywne i powtarzalne należy unieruchomić pacjenta w takcie napromieniania. Wykorzystuje się do tego specjalnie zaprojektowane unieruchomienie Encompass (Qfix), które jest podstawką dedykowaną tylko do realizacji tej techniki, połączoną z wieloelementową, sztywną maską termoplastyczną wykonywaną indywidualnie dla każdego pacjenta. Sposób unieruchomienia pacjenta został przedstawiony na rycinie 2. Maskę składa się z części tylnej i przedniej, a całość mocowana jest do stołu terapeutycznego.



Rycina 2. System unieruchomienia pacjenta Encompass (Qfix) oraz maska termoplastyczna wykorzystywana w technice HyperArc [11]

## Plany leczenia w technice HyperArc

Planowanie leczenia w tej technice składa się z kilku zależnych od siebie etapów. Pierwszym z nich jest obrysowanie narządów krytycznych (OAR, organs at risk) oraz PTV. Na podstawie uzyskanych skanów z tomografii komputerowej pacjenta należy dopasować system Encompass na podstawie trzech znaczników (rycina 3). Jest to niezbędny element w tworzeniu planu leczenia w technice HyperArc.



Rycina 3. Wizualizacja systemu do unieruchomienia pacjenta Encompass wraz tomografią pacjenta [13]

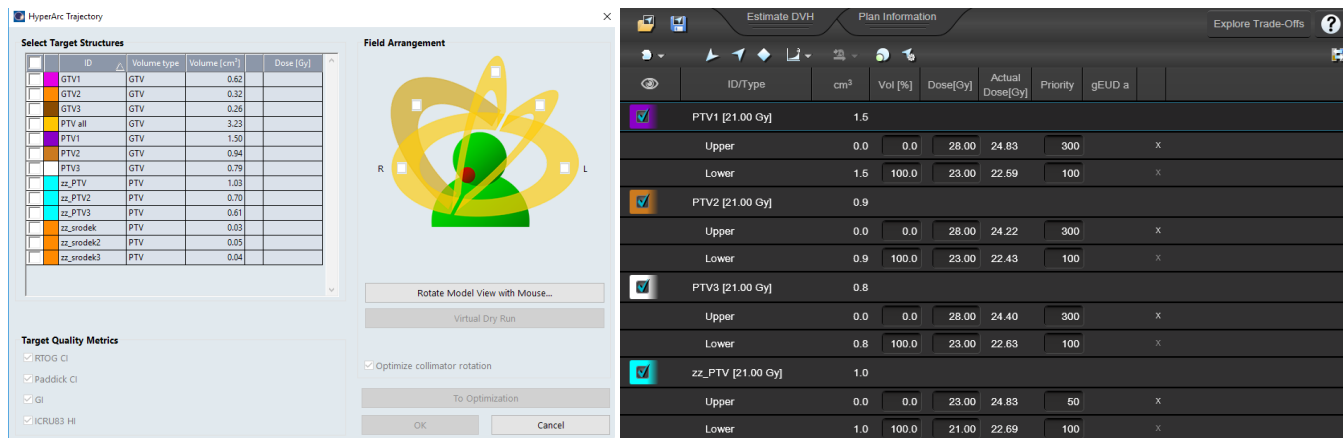
Do utworzenia planów w technice HyperArc wykorzystuje się dedykowany do tego moduł komputerowego systemu planowania leczenia Eclipse (Varian Palo Alto, USA). W odróżnieniu od planów standardowych w planowaniu SRS dawka zadana jest najczęściej na izodozę 80%. W module istnieje także możliwość wyboru PTV, które mają być leczone oraz wyboru dawki do każdego z tych PTV (umożliwia to zastosowanie różnych dawek dla różnych PTV). Wartości przypisanych dawek do każdego PTV wykorzystuje się do obliczania wskaźników jakości planu leczenia oraz do automatycznego zdefiniowania celów w trakcie optymalizacji planu leczenia. Przykładowe okno wyboru objętości tarczowych oraz optymalizacji rozkładu dawki dla techniki HyperArc przedstawiono na rycinie 4.

Optymalizację planów leczenia rozpoczyna się od doboru optymalnego kąta kolimatora dla każdego z łuków (przy pomocy specjalnego algorytmu), który ma na celu zminimalizowanie występowania wysokich dawek w obszarze mózgowia pomiędzy guzami. Optymalizator ten posiada dwa różne algorytmy: pierwszy z nich jest to algorytm SRS-NTO, którego zadaniem jest redukcja dawki w zdrowej tkance otaczającej zmianę nowotworową bez konieczności definiowania struktur pomocniczych wokół każdego PTV; drugim algorytmem jest algorytm ALDO, który zapewnia, że każda zmiana nowotworowa jest objęta przypisaną dawką nawet jeśli te dawki różnią się od siebie. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie różnych dawek terapeutycznych dla poszczególnych guzów u tego samego pacjenta.

Plany leczenia w technice HyperArc realizowane są na klasycznym akceleratorze liniowym TrueBeam (Varian Medical Systems, USA). Aparat ten może być wyposażony w kolimator wielolistkowy MLC o szerokości listków 5 lub 10 mm, natomiast dla pola 10 x 10 cm w izocentrum szerokość ta wynosi 2.5 mm lub 5 mm w zależności od konstrukcji kolimatora MLC. Wykorzystywane są również aparaty z kolimatorami o wysokiej rozdzielczości HD o szerokości listka 2.5 mm. Układ wiązek w module planowania HyperArc zawiera automatyczne umiejscowienie izocentrum na podstawie lokalizacji PTV, a jest to środek ciężkości



wszystkich niepromienianych PTV. Dawka zadana jest na niższą niż w klasycznej radioterapii najczęściej izodozę 80%. Stosuje się wiązkę promieniowania fotonowego o energii 6MeV bez filtra spłaszczającego (FFF, flattening filter free). Plan leczenia składa się z maksymalnie 5 nie-współpłaszczyznowych łuków, w oparciu o 4 z 5 możliwych ustalonych kątowych pozycji stołu do wyboru pomiędzy ( $0^\circ, \pm 45^\circ, +90^\circ$ ) i ( $0^\circ, \pm 45^\circ, -90^\circ$ ), przy czym każdy łuk ma stałą długość  $180^\circ$ .



Rycina 4. Przykładowe okno wyboru objętości tarczowych oraz optymalizacji rozkładu dawki dla techniki HyperArc [13]

## Weryfikacja dozymetryczna

Jednym z elementów zapewnienia kontroli jakości leczenia jest weryfikacja dozymetryczna. Dla technik dynamicznych weryfikacja przeprowadzana jest przed rozpoczęciem leczenia radioterapeutycznego. Celem weryfikacji jest sprawdzenie poziomu odtworzenia planu leczenia na akceleratorze medycznym. Technika HyperArc jest techniką dynamiczną, więc konieczna jest weryfikacja dozymetryczna, co najmniej na płaszczyźnie dwuwymiarowej ze względu na znaczny gradient w rozkładzie dawki, charakterystyczny dla technik dynamicznych. W tym celu zastosowanie mają matryce wielodetektorowe oraz elektroniczne kasety portalowe EPID (ang. Electronic Portal Imaging Device) [9,10].

## Podsumowanie

System HyperArc umożliwia tworzenie planów leczenia w większym stopniu w sposób automatyczny; automatyczne ustawione/uśrednione izocentrum, zoptymalizowany kąt kolimatora dla każdego łuku oraz automatyczny wybór liczby i zakresu łuków. HyperArc pozwala osiągnąć dobrą jakość planów stereotaktycznych, ogranicza dostarczenie wysokich dawek do narządów krytycznych, co jest istotne w przypadku ponownego późniejszego napromienienia pacjenta w trakcie dalszego leczenia. Dzięki optymalizacji zredukowana jest wysoka dawka w zdrowej tkance oraz pomiędzy PTV. W porównaniu z innymi technikami stereotaktycznymi umożliwia znacznie krótszy czas napromieniania, podobny do czasu leczenia w technikach dynamicznych VMAT czy IMRT. Zapewnia to większy komfort dla pacjenta, a także pozwala na leczenie wielu zmian.

## Piśmiennictwo

- [1] A. Skrobała, Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do optymalizacji rozkładów dawek w radioterapii stereotaktycznej obszarów wewnątrzczaszkowych
- [2] M. Hutnik, K. Skłodowski, A. Wygoda et. al., Dawki tolerancji dla narządów krytycznych w radioterapii chorych na raka głowy i szyi, *Via Medica* 2013, nr 1, 35 – 47
- [3] R. Ruggieri, S. Naccarato, R. Mazzola et. al, Linac-based VMAT radiosurgery for multiple brain lesions: comparison between a conventional multi-isocenter approach and a new dedicated mono-isocenter

- technique, Radiation Oncology (2018) 13:38
- [4] R. Ruggieri , S. Naccarato, R. Mazzola et. al., Linac-based radiosurgery for multiple brain metastases: Comparison between two mono-isocenter techniques with multiple non-coplanar arcs, Radiotherapy and Oncology 132 (2019) 70–78
  - [5] A. Mucha-Małecka, B. Gliński, E. Jakubowicz, Radiochirurgia stereotaktyczna w praktyce klinicznej Onkol. Prak. Klin. 2013; 9, nr 4: 123–127
  - [6] M.Spych, J. Fijuth, M.Klonowicz et. al Techniki stereotaktyczne w radioterapii guzów ośrodkowego układu nerwowego, Onkologia w Praktyce Klinicznej 2007 3, nr 3, 135– 139
  - [7] K. Ślosarek, B. Maciejewski, A. Zajusz et. al., Opis napromniowania techniką obrotową z zastosowaniem dynamicznego kolimatora wielolistkowego NOWOTWORY 2000 /tom 50 Zeszyt 3 /268-279
  - [8] G.Woźniak, Ł.Dolla, K.Ślosarek et. al Radioterapia stereotaktyczna łukami dynamicznymi z zastosowaniem bramkowania oddechowego — prezentacja techniki NOWOTWORY 2017, tom 2, nr 5, 384–388
  - [9] M. Podesta, S. M J J G Nijsten, L. C G G Persoon, et al Time dependent pre-treatment EPID dosimetry for standard and FFF VMAT Physics in Medicine & Biology, Volume 59, Number 16
  - [10] G. Smyth, P. M Evans, J. C Bamber et. al *Dosimetric accuracy of dynamic couch rotation during volumetric modulated arc therapy (DCR-VMAT) for primary brain tumours* Physics in Medicine & Biology, Volume 64, Number 8
  - [11] źródło:<https://qfix.com/catalog/radiotherapy-thermoplastics/encompass-srs-fibreplast-system> dostęp 03.12.2022
  - [12] J. H. Suh, MD Stereotactic radiosurgery in the treatment of patients with brain metastases, N Engl J Med 2010; 362: 1119-1127
  - [13] HyperArc intracranial Stereotactic Treatment -Blueberry Phase 1