



Radioterapia protonowa cz. 1: Podstawy fizyczne

Proton radiotherapy, part 1: Basic physics

Marzena Rydygier¹, Marta Bałamut¹, Katarzyna Czerska¹, Hubert Jabłoński¹, Wiktor Komenda¹,
Dawid Krzempek¹, Małgorzata Liszka², Natalia Mojżeszek¹, Paweł Rogalski¹, Renata Kopeć¹

¹ Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, tel. (+48) 12 399 6221, e-mail: marzena.rydygier@ifj.edu.pl

² SkandionKliniken, von Kraemers Allé 26, 75-237 Uppsala, Szwecja

Oddziaływanie jonów z materią

Depozycja dawki przekazywanej do ośrodka, przez który przechodzi wiązka protonów o energii wykorzystywanej w radioterapii, zachodzi poprzez trzy główne grupy procesów [1]:

- rozpraszanie niesprężyste na elektronach ośrodka – protony, poruszając się w ośrodku materialnym, wytracają energię głównie w efekcie oddziaływania swojego pola elektrycznego z elektronami atomów ośrodka, powodując wzbudzenie lub jonizację atomów. Transfer energii cząstki do elektronu odbywa się kosztem energii kinetycznej tej cząstki, dlatego energia cząstek w wiązce stopniowo maleje;

- rozpraszanie sprężyste na jądrach atomowych – w oddziaływaniu kulombowskim z jądrami atomowymi protony mogą ulec rozproszeniu pod większym kątem niż ma to miejsce w oddziaływaniu z elektronami, głównie ze względu na większą masę jąder atomowych. Przemierzając przez materię, protony ulegają wielu oddziaływaniom tego typu, stąd proces ten określany jest w literaturze jako wielokrotne rozpraszanie kulombowskie (ang. *Multiple Coulomb Scattering*, MCS);
- reakcje jądrowe – proton traci znaczną część swojej energii, a jądro ulega reakcji.

Przekaz energii przez wiązkę protonową do ośrodka odbywa się głównie w wyniku utraty energii pojedynczych cząstek

Streszczenie

Bezpieczne stosowanie promieniowania jonizującego w radioterapii wymaga głębokiej znajomości procesów oddziaływania promieniowania z materią. Odnosi się to w szczególności do wiązek protonów, gdzie możliwe jest uzyskanie lepszej niż w przypadku wiązek fotonowych konformalnej rozkładu dawki w obszarze leczonym. Radioterapia protonowa wykazuje wiele korzystnych własności, m.in. dobrze zdefiniowany zasięg, korzystny rozkład dawki z głębokością oraz mniejsze rozpraszanie poprzeczne wiązki. Dokładne poznanie zjawisk i oddziaływań towarzyszących przechodzeniu wiązki protonowej przez materię jest kluczowe w celu prawidłowego rozumienia zależności fizycznych i prawidłowego przeprowadzenia radioterapii. W niniejszym opracowaniu przedstawiono główne zagadnienia oddziaływania cząstek naładowanych z materiałem ośrodka, których zrozumienie jest niezbędne do prawidłowej charakterystyki wiązki protonowej.

Słowa kluczowe: radioterapia protonowa, podstawy fizyczne, oddziaływanie jonów z materią, głębokościowy rozkład dawki

Abstract

A comprehensive knowledge of processes of radiation interaction with matter is essential, in order to ensure the safe use of ionizing radiation in radiotherapy. This applies particularly to therapeutic proton beams, where providing more conformal dose distribution, compared to photon beams, is well feasible. Radiotherapy techniques, using beams of energetic protons provide a series of advantages, like well-defined radiation dose range, Bragg peak dependence of the depth-dose distribution or reduced transverse scattering of the beam. A thorough understanding of the phenomena of interactions of charged particles with matter, is crucial to properly investigate the physical relationships and safely conduct the radiotherapy. This review presents the main issues of the interaction of charged particles with matter, as its full comprehension is necessary for proper characterization of a proton beam.

Key words: proton radiotherapy, basic physics, interaction of ions with matter, depth dose distribution

70

otrzymano / received:

11.02.2022

poprawiono / corrected:

15.02.2022

zaakceptowano / accepted:

24.02.2022



poprzez oddziaływania kulombowskie, pomiędzy dodatnio naładowanymi protonami i ujemnymi ładunkami elektronów orbitalnych atomów ośrodka [2]. Rozpraszanie protonów w ośrodku może zachodzić także poprzez ich elektromagnetyczne oddziaływanie z jądrami atomów ośrodka oraz w wyniku reakcji jądrowych, jednak te ostatnie nie wnoszą istotnego wkładu do osłabienia strumienia (fluencji) wiązki z głębokością [2]. Oddziaływania jądrowe mogą odgrywać znaczącą rolę jedynie w przypadku, gdy odległość pomiędzy torem protonów a jądrem atomów ośrodka jest porównywalna ze średnicą jądra (określoną przybliżoną zależnością: $1,18 A^{1/3} - 0,48$ fm, gdzie A to liczba nukleonów jądra) [3]. Z tego względu, w kontekście fizyki radiacyjnej i dozimetrii, oddziaływanie cząstek naładowanych z jądrami atomów ośrodka nie jest na ogół uwzględniane [4].

Dodatковым procesem towarzyszącym przejściu wiązki protonowej przez ośrodek jest generacja promieniowania hamowania (niem. *Bremsstrahlung*), do której dochodzi wskutek zmiany kierunku ruchu cząstki naładowanej znajdującej się w polu jądra atomowego. Prawdopodobieństwo generacji promieniowania hamowania jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu masy cząstki $P(Brem) \propto \frac{1}{m_{cz}^2}$, stąd dla protonów jest ono kilka milionów razy mniejsze niż dla elektronów i w opisie oddziaływań na potrzeby radioterapii protonowej najczęściej jest pomijane [5].

W zależności od wartości energii przekazanej w pojedynczym akcie oddziaływania może nastąpić wzbudzenie atomu ośrodka (przeniesienie elektronu na wyższą powłokę elektronową) lub jego jonizacja (wybicie elektronu z atomu). Transfer energii cząstki do elektronu odbywa się kosztem jej energii kinetycznej, w związku z czym energia cząstek w wiązce stopniowo maleje. W trakcie przechodzenia protonu przez materię generowane są zatem elektrony wtórne oraz elektrony delta, które jednak mają krótki zasięg ze względu na przekaz małej porcji energii w pojedynczym akcie oddziaływania. Z głębokością penetracji maleje również strumień (fluencja) cząstek w wiązce, w wyniku rozproszenia i reakcji jądrowych. Przyjmuje się, że ok. 1% początkowej liczby protonów jest tracona na każdym centymetrze wody, przez który wiązka przechodzi [6].

Dla cząstek o energii rzędu megaelektronowoltów energia tracona w pojedynczym akcie jonizacji stanowi bardzo mały procent energii kinetycznej cząstki. Stąd na wytracenie energii i zatrzymanie cząstki wymagana jest ogromna liczba aktów jonizacji. Straty energii mają więc quasi-ciągły charakter. Wielkością charakteryzującą średnie straty energii cząstki dE na jednostkę jej drogi w ośrodku materialnym dx o gęstości ρ opisuje równanie Bethego-Blocha [7], [8].

$$\frac{1}{\rho} S = -\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

gdzie: N_A – liczba Avogadro, $r_e = \frac{e^2}{m_0 c^2} \approx 2,818 \cdot 10^{-13} m$ to klasyczny promień elektronu, m_e to masa spoczynkowa elektronu,

c – prędkość światła, z – ładunek jonu, Z – liczba atomowa ośrodka, A – liczba masowa, $\beta = v/c$ to prędkość cząstki w jednostkach prędkości światła, gdzie v – prędkość jonu, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, I – średni potencjał jonizacyjny (ang. *average excitation potential*) atomów ośrodka – może być aproksymowany wyrażeniem $I = 16 \cdot Z^{0,9} eV$ (dla $Z > 1$), E – energia kinetyczna cząstki (protonu), $\frac{C}{Z}$ – współczynnik korekcji powłokowej (ang. *shell correction*) oraz δ jako współczynnik korekcji gęstościowej (ang. *density-effect correction*) – czynnik uwzględniający ekranowanie ładunku cząstki padającej przez pole elektronów ośrodka – istotny dla ośrodków o dużych gęstościach, do pominięcia dla gazów.

Z równania 1.1 można zatem wywnioskować, że:

- średnia strata energii na jednostkę drogi jest proporcjonalna do odwrotności kwadratu prędkości protonu $\left(S \sim \frac{1}{\beta^2} \right)$;
- średnia strata energii na jednostkę drogi jest proporcjonalna do kwadratu ładunku jonu $(S \sim z^2)$;
- na stratę energii protonu znaczny wpływ ma rodzaj absorbenta, przez który przechodzi cząstka, przede wszystkim tzw. gęstość elektronowa ośrodka materialnego $\left(S \sim N_A \rho \frac{Z}{A} \right)$;
- zdolność hamowania zależy od średniego potencjału jonizacji materiału atomów ośrodka $\left(S \sim \ln \left(\frac{1}{I} \right) \right)$.

Dla cząstki o danej energii przemieszczającej się w danej odległości od jądra atomowego ilość przekazanej energii będzie tym wyższa, im większa liczba atomowa atomów ośrodka. Natomiast im cząstka przelatująca w pobliżu atomu ma większą masę m , to przy tej samej energii kinetycznej leci wolniej, więc dłużej znajduje się w zasięgu oddziaływań i tym więcej energii przekazuje atomom ośrodka. Ujemny znak przed wyrażeniem dE/dx oznacza, że straty energii pomniejszają wartość energii cząstki.

Powszechnie stosowaną jednostką zdolności hamowania (S) jest $[keV/\mu m]$. Natomiast pojęcie masowej zdolności hamowania wyraża zdolność hamowania podzieloną przez lokalną gęstość materiału (ρ), wyrażoną w jednostkach $[Jm^2 kg^{-1}]$, wyrażane jest jednak zazwyczaj w $[MeV cm^2 g^{-1}]$.

Należy mieć jednak na uwadze, że formuła Bethego-Blocha jest jedynie przybliżonym wyrażeniem i obejmuje tylko straty energii cząstek na jonizację. W obszarze bardzo wysokich energii występują efekty relatywistyczne, nieuwzględnione w tej formule – energia tracona jest również na tzw. promieniowanie hamowania. W obszarze bardzo niskich energii, kiedy prędkości cząstek w materii stają się porównywalne z prędkościami elektronów ośrodka, występują efekty oddawania i przechwytywania elektronów przez przechodzącą cząstkę, co również nie jest uwzględnione we wzorze (1.1) [9]. Przyjmuje się zatem, że formuła Bethego-Blocha opisuje prawidłowo oddziaływania protonów o energiach z zakresu ok. 3 MeV – 300 MeV, wykorzystywanych standardowo w celach klinicznych [10].



Podstawowe wielkości fizyczne

Równie często stosowaną wielkością jest tzw. *liniowe przekazanie energii* (ang. *Linear Energy Transfer, LET*), czyli średnia wartość energii lokalnie uzyskiwana przez ośrodek, przez który przechodzi cząstka naładowana:

$$LET = -\frac{dE}{dx} \quad (1.2)$$

Liniowa zdolność hamowania (S) jest własnością cząstki przechodzącej przez ośrodek i opisuje stratę jej energii na jednostkowej drodze, podczas gdy liniowe przekazanie energii (ang. *Linear Energy Transfer, LET*) oznacza energię przekazaną do ośrodka na jednostkowej drodze, ale w pewnym pasie wzdłuż tej drogi. Dla ciężkich cząstek naładowanych (np. protonu, jonów węgla) wartości liniowej zdolności hamowania S oraz LET są praktycznie identyczne, natomiast dla cząstek lekkich (elektrony, pozytony) straty energii na wytworzenie powstających w procesie jonizacji ośrodka elektronów δ oraz promieniowania hamowania, które nie prowadzi do lokalnej depozycji energii, powodują, że S i LET mogą różnić się od siebie [11]. Innymi słowy, im więcej cząstek unoszących ener-

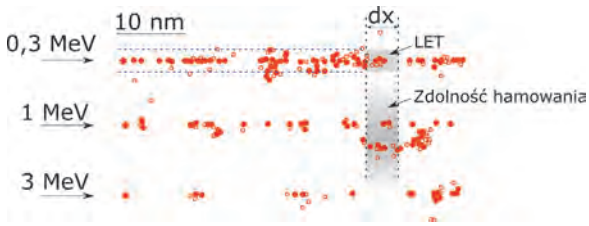
Dawka pochłonięta w ośrodku, przez który przechodzi cząstka, to stosunek średniej wartości utraconej energii cząstki przekazanej do elementu masy tego ośrodka. Zakładając, że dN protonów przechodzi przez cylinder o przekroju dA i grubości dx , dawkę, jaka zostanie zdeponowana, można przedstawić jako [10]:

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{-\left(\frac{dE}{dx}\right) \cdot dx \cdot dN}{\rho \cdot dV} = \frac{S \cdot dx \cdot dN}{\rho \cdot dx \cdot dA} = \frac{S}{\rho} \cdot \Phi \quad (1.4)$$

Wielkość dx z licznika i mianownika się skraca, stosunek dN/dA zdefiniowano jako fluencję wiązki. Wielkość S/ρ określa się również jako masową zdolność hamowania wyrażaną w $\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^3)$. Chcąc wyrazić dawkę zdeponowaną w cienkiej warstwie ośrodka, przez którą cząstka przechodzi (ang. *track segment*) w jednostkach układu SI, można postawić się zależnością:

$$D_{TS} = 0,1602 \cdot \Phi \cdot LET \cdot \frac{1}{\rho} [\text{Gy}] \quad (1.5)$$

gdzie $\text{Gy} = \text{J}/\text{kg}$, przyjmuje się fluencję Φ wyrażoną w Gp/cm^2 ($\text{Gp} = \text{gigaproton} = 10^9$ protonów), $S = \text{LET}$ wyrażone jest w MeV/cm , ρ jest gęstością materiału absorbenta wyrażoną w g/cm^3 , natomiast po odpowiednich przekształceniach $1 \text{ MeV} = 0,1602 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ [10].



Ryc. 1 Ilustracja graficzna zdolności hamowania cząstek naładowanych (S) i liniowego przekazu energii (LET). Liniowa zdolność hamowania (S) jest własnością cząstki, która przechodzi przez ośrodek – opisuje stratę jej energii na jednostkowej drodze dx ; liniowe przekazanie energii (ang. *Linear Energy Transfer, LET*) oznacza energię przekazaną do ośrodka na jednostkowej drodze dx , ale w pewnym pasie wzdłuż tej drogi. Źródło: Opracowanie własne na podstawie rys. 10 w [12].

gię poza obszar śladu cząstki, tym S i LET bardziej się od siebie różnią. Na rycinie 1 zilustrowano różnicę zdolności hamowania (S) cząstek naładowanych i liniowego przekazu energii (LET).

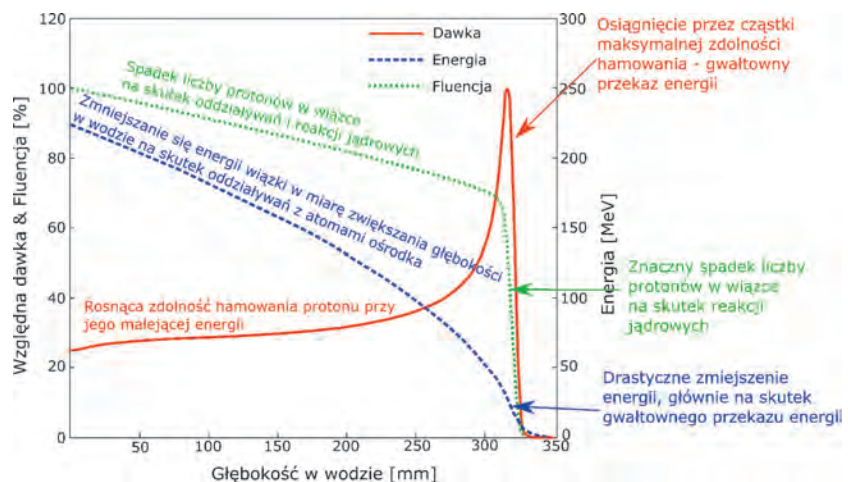
Fluencja cząstek i dawka są podstawowymi wielkościami opisującymi natężenie wiązki oraz energię zdeponowaną przez wiązkę cząstek w absorbencie. Fluencję wiązki cząstek (np. protonów) definiuje się [13] jako:

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (1.3)$$

gdzie dN to liczba cząstek, które weszły do kuli o polu wielkiego kąta dA . Jednostką fluencji jest liczba cząstek padających na jednostkę powierzchni przekroju kuli (w płaszczyźnie prostopadłej do toru kierunku cząstek) [14].

Procentowa dawka głęboka PDG – jej obszary oraz fizyczne podstawy ich powstawania

Energia zdeponowana przez protony rośnie wraz z głębokością, aż do osiągnięcia maksimum, które pojawia się pod koniec zasięgu cząstek. Krzywa opisująca straty energii cząstek naładowanych w funkcji głębokości wnikania nazywana jest w literaturze „krzywą Bragga”. Na rycinie 2 zamieszczono wykres zależności dawki względnej, fluencji oraz energii wiązki protonowej o energii 226 MeV od głębokości w ośrodku.



Ryc. 2 Dawka głęboka (czerwona linia) w wodzie dla równoległej wiązki protonowej o energii 226 MeV. Ze względu na charakter strat energii cząstek naładowanych pik Bragga pojawia się na określonej głębokości (w prezentowanym przypadku na 318 mm). Przebieg dawki głębokiej zdeteminowany jest przez stochastyczny charakter start energii (rozrzut zasięgu), reakcje jądrowe, rozmiar i rodzaj użytego detektora, rozmiar wiązki oraz geometrię pomiarową. Dodatkowo na wykresie zamieszczono wykres spadku fluencji w funkcji głębokości (zielona linia). Na niebiesko zaznaczono zmianę energii cząstek wraz ze zmianą głębokości w ośrodku. Źródło: Opracowanie własne.

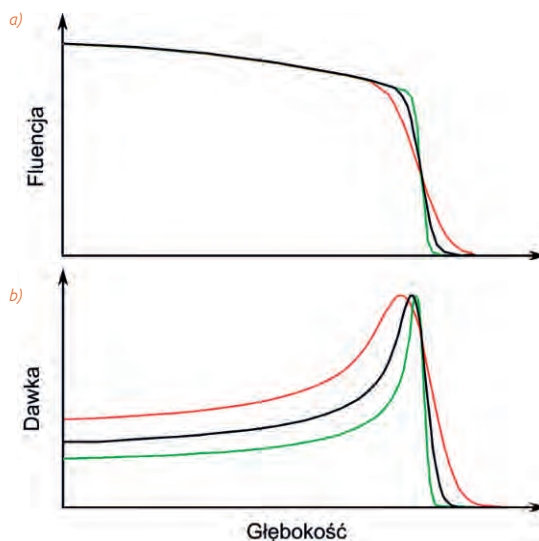
Rozkład dawki głębokiej wiązki protonowej odznacza się obszarem narastania dawki (ang. *build-up*). Obszar ten jest jednak trudno zauważalny ze względu na fakt, iż wiązka protonowa, przechodząc z powietrza do ośrodka, generuje stosunkowo małą liczbę cząstek wtórnych. Obszar narastania dawki znacznie łatwiej jest zaobserwować dla szerokiej wiązki wysokoenergetycznych protonów, gdzie protony niskoenergetyczne produkowane na krawędziach kolimatora nie maskują tego obszaru [6]. Poza regionem „podbicia” poziomu dawki na większych głębokościach występują dwa konkurujące ze sobą zjawiska – przyrost zdolności hamowania z głębokością oraz spadek fluencji (liczby protonów w wiązce) z głębokością, głównie ze względu na rozpraszanie kulombowskie, z niewielkim udziałem oddziaływań jądrowych. W wyniku oddziaływań jądrowych z materiałem absorbenta (np. tkanki) nieco maleje liczba pierwotnych protonów w wiązce, ale mogą wtedy pojawić się w wiązce cząstki wtórne, jak neutrony, protony wtórne czy jony helu, węgla lub innych cząsteczek, generowane w wyniku tych reakcji [15]. Protony, obniżając swoją energię, osiągają w części dystalnej swojego zasięgu zakres maksymalnej zdolności hamowania (a więc depozycji energii – czyli dawki) i ostatecznie zatrzymują się w materiale ośrodka. Jak już wspomniano, nie wszystkie protony zatrzymują się jednak dokładnie na tej samej głębokości. Gdyby tak było, dystalne zaniki dawki i fluencji byłyby na końcu zasięgu wiązki reprezentowane na rycinie 2 przez proste „pionowe” linie. Obserwowane w rzeczywistości dystalne gradienty dawki (i fluencji) mają duże znaczenie w radioterapii protonowej i wiążą się ze statystycznymi fluktuacjami zasięgu poszczególnych protonów w wiązce [16].

Wielkość strat energii protonu w ośrodku podlega fluktuacjom mającym dwa źródła [10]:

- fluktuacje liczby kolizji protonu z elektronami ośrodka – ze zwiększaniem się zasięgu wiązki zwiększa się liczba oddziaływań cząstki z elektronami ośrodka oraz wartość jej energii utracona podczas każdego oddziaływania, co powoduje większe rozmycie na dystalnym gradientie dawki oraz poszerzenie piku (FWHM);
- fluktuacje ilości energii utraconej podczas każdego zderzenia – na całkowitą szerokość rozmycia zasięgu wynikającą z fluktuacji energetycznych jest rozmycie energii w ośrodku (ang. *energy straggling*) oraz czynnik będący wynikiem rozmycia energetycznego wiązki przy jej wlocie (ang. *initial energy spread*), np. po przejściu przez degrader.

Na rycinie 3 zilustrowano rozkład fluencji (Ryc. 3a) oraz rozkład dawki (Ryc. 3b) zmieniające się z głębokością w materiale, dla różnego rozmycia energetycznego wiązki. Mimo że szerokość dystalnego gradientu liczby protonów oraz dawki jest znacząco różny, to w każdym przypadku zasięg danej wiązki występuje na tej samej głębokości.

Jak widać na rycinie 3, fluktuacje liczby kolizji cząstek naładowanych z atomami ośrodka powodują zmiany dystalnego gradientu fluencji, co w konsekwencji prowadzi do zmiany kształtu rozkładu dawki, mimo że fizyczny zasięg wiązki będzie taki sam.



Ryc. 3 Zasady pomiaru zasięgu wiązki protonowej o różnym rozmyciu energetycznym przy pomocy różnych metod: a) zależność fluencji cząstek od głębokości; b) rozkład dawki z głębokością – krzywa Bragga

Źródło: Opracowanie własne na podstawie rys. 2.8 w [14].

Zasięg wiązki cząstek naładowanych

Zasięg wiązki w materiale rozumiany jest zwykle jako dystans, na jaki dana cząstka może dotrzeć. W praktyce określany jest dla całej wiązki protonów i definiowany jako głębokość, na jakiej liczba cząstek pierwotnych wchodzących do ośrodka spada do połowy [6], [14]. Zasięg tak zdefiniowany jest tzw. zasięgiem fizycznym. Rycina 3 ilustruje związek, jaki zachodzi pomiędzy rozkładami z głębokością: fluencji (a) oraz dawki (b). Na podstawie tych zależności można określić zasięg wiązki poprzez pomiar zmian fluencji z głębokością. Przyjmuje się, że w obszarze niskiego gradientu fluencji liczba pierwotnych protonów traconych przez oddziaływanie jądrowe wynosi ok. 1% na każdy centymetr wody, przez który przechodzi wiązka [6].

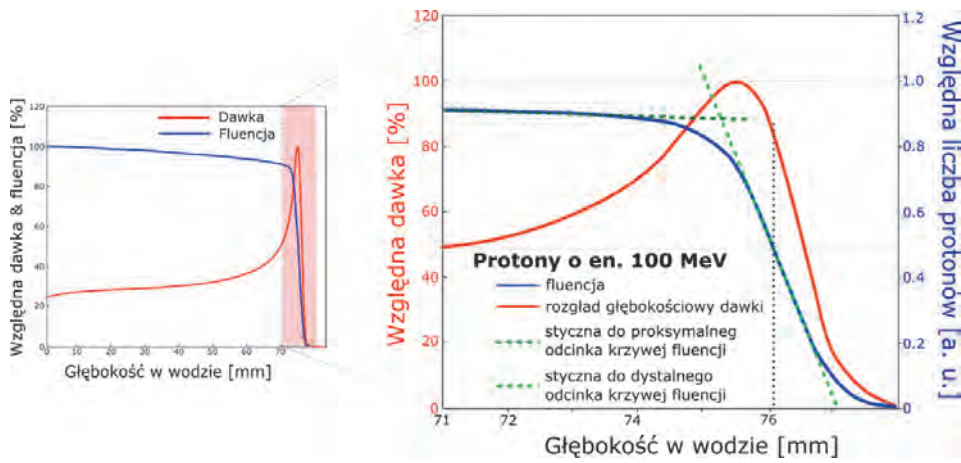
Głębokość, na której początkowa liczba protonów spada do połowy, odpowiada głębokości, na której dawka głęboka na dystalnym gradientie osiąga 80%, co jest definiowane jako głębokość zasięgu danej wiązki protonowej [6]. Ilustrację tej definicji można zaobserwować na rycinie 4 poniżej:

Zasięg protonów jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do gęstości materiału. Zatem zasięg cząstki R (np. protonów) o energii E w jednorodnym ośrodku można wyznaczyć, całkując wyrażenie określające masową zdolność hamowania po energii cząstki w zakresie energii od 0 do E według wzoru (1.6) [10], [17]:

$$R(E) = \int_0^E \left(\frac{dE}{\rho dx} \right)^{-1} dE = \int_E^0 \frac{dE}{S/\rho} \quad (1.6),$$

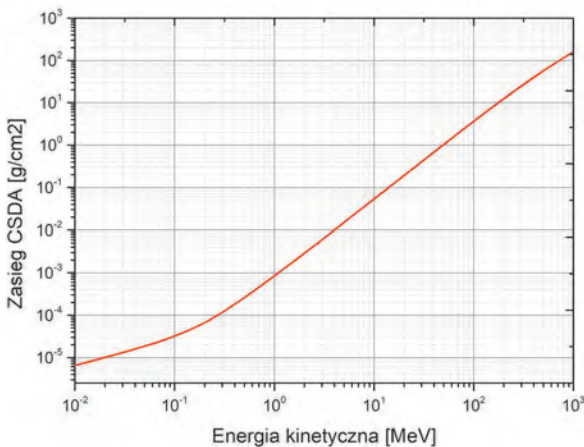
gdzie wyznaczony zasięg wyrażony będzie w g/cm^2 .

Powyższy wzór (1.6) określany jest jako przybliżenie ciągłego spowalniania (ang. *Continuous Slowing Down Approximation*, CSDA) i zakłada, że transfer energii spowalnianej cząstki naładowanej następuje jedynie w zderzeniach z elektronami ośrodka. Zasięg R uzyskany na podstawie CSDA jest w rzeczywistości



Ryc. 4 Ilustracja fragmentu krzywej Bragga z zaznaczoną wertykalną przerywaną linią, łączącą 50% początkowej liczby protonów w wiązce oraz krzywą rozkładu głębokościowego dawki, dla której w tym punkcie wynosi 80,7%
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie rys. 1.11 w [6].

przybliżeniem całkowitej drogi, jaką przebyły protony aż do zatrzymania się, a więc nie uwzględnia stochastycznych fluktuacji zasięgu czy wielokrotnych rozpraszania kulombowskich MCS. W zakresach energii protonów wykorzystywanych klinicznie wartości uzyskiwane z CSDA są dobrym przybliżeniem zasięgu protonów [10]. Na rycinie 5 zamieszczono wykres zależności zasięgu wyznaczonego za pomocą przybliżenia ciągłego spowalniania (CSDA) w funkcji energii cząstek.



Ryc. 5 Wykres zależności zasięgu protonów wyznaczonego za pomocą przybliżenia ciągłego spowalniania RSCDA w funkcji energii w zakresie 0,01-500 MeV w wodzie
 Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z bazy PSTAR [18].

Praktyczną formułę pozwalającą na obliczenie średniego zasięgu wiązki cząstek naładowanych w danym ośrodku absorbującym można zapisać jako [10]:

$$R \approx \alpha E^p \quad (1.7),$$

gdzie: α to parametr stały, zależny od składu ośrodka absorbującego, E to początkowa energia wiązki protonów, natomiast p to parametr uwzględniający energię lub prędkość protonu. Do obliczenia średniego zasięgu wiązki protonów w wodzie można się posłużyć uproszczoną formą równania [10]:

$$R = 0,00244E^{1.75} \frac{g}{cm^2} \quad (1.8),$$

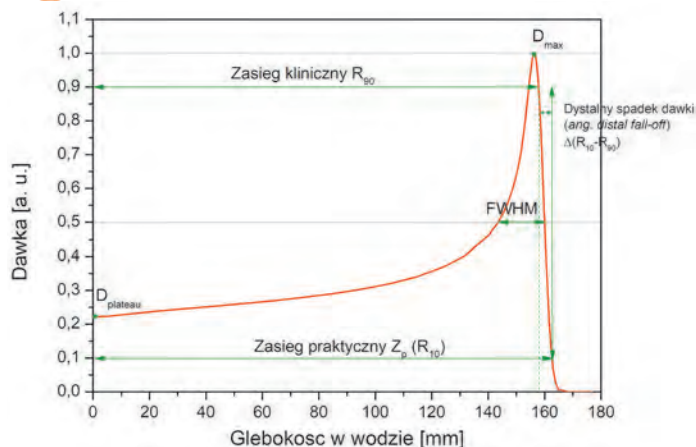
gdzie: E jest wyrażone w MeV. W zależności od energii wykładnik potęgi we wzorze (1.8) może się nieznacznie zmieniać. Podany wzór wyznaczono dla cząstek o energii z zakresu 100 MeV – 200 MeV [10].

Opis parametrów krzywej Bragga

Ostateczny kształt krzywej piku Bragga zależy zarówno od parametrów pierwotnej wiązki protonowej, traktu formowania wiązki oraz od sposobu i geometrii, w jakiej pomiar jest wykonany. W związku z powyższym każde stanowisko wykorzystujące wiązkę protonową będzie wykorzystywało rozkład głębokościowy dawki o charakterystycznym dla niego kształcie, opisywanym przez szereg parametrów.

Wielkością charakteryzującą wlotową część rozkładu głębokościowego jest dawka wlotowa $D_{plateau}$. Dla rozkładu głębokościowego często określa się stosunek dawki w maksimum piku Bragga do dawki wlotowej $D_{MAX}/D_{plateau}$.

Obszar piku Bragga jest charakteryzowany poprzez szerokość połówkową (ang. *full-width at half maximum*, FWHM) piku. Niekiedy podaje się też szerokość piku na wysokości 80% wartości maksymalnej. Szerokość piku Bragga na wysokości 80% wartości maksymalnej ma praktyczne zastosowanie przy projektowaniu modulatorów do formowania poszerzonego piku Bragga [14] lub ustalania odległości pomiędzy płaszczyznami napromieniania (ang. *layer spacing*) dla skanującej wiązki protonowej. Zasięg R_{90} często stosowany w praktyce klinicznej oznacza głębokość, na jakiej dawka względna spada do 90% w dystalnym gradiencie dawki. To właśnie tę głębokość nazywamy zasięgiem wiązki. Zasięg praktyczny R_{10} to analogicznie głębokość, na jakiej dawka względna spada do 10% w obszarze dystalnego gradientu. Zasięg R_{10} jest ważny z punktu widzenia dozymetrii wiązki protonowej, ponieważ z wykorzystaniem tej wartości wyznacza się współczynnik jakości promieniowania k_Q



Ryc. 6 Rozkład głębokościowy depozycji dawki w wodzie, tzw. krzywa Bragga, dla monoenergetycznej wiązki protonów o energii 150 MeV. Krzywa zmierzona za pomocą komory Bragg Peak Chamber, znormalizowana do dawki w maksimum piku Bragga. Na rycinie zaznaczono zasięgi kliniczny (R_{90}) oraz praktyczny (R_{10}), dawkę wlotową ($D_{plateau}$), dawkę w maksimum rozkładu (D_{max}), szerokość półwyskową (FWHM) oraz obszar spadku dystalnego piku Bragga pomiędzy wartością 90% i 10% dawki w maksimum (ang. distal fall-off)
 Źródło: Opracowanie własne.

(więcej szczegółów dotyczących dozymetrii zostanie podanych w kolejnych częściach serii artykułów o radioterapii protonowej).

Obszar dystalny za maksimum piku Bragga (ang. *distal fall-off*) jest charakteryzowany poprzez podanie wartości szerokości gradientu spadku dawki. W radioterapii protonowej szerokość ta często jest podawana jako dystans, na jakim dawka spada

reklama

KOSS

Aparaty RTG analogowe cyfrowe


TELERRADIOLOGIA
już od 9,00 zł za badanie



Radiografia cyfrowa DR

RENTGEN-SERWIS
Zygmunt Koss Rafał Koss
ul. Kasjopei 8 • 80-299 Gdańsk
tel. 603 270 482
e-mail: rentgenserwis@gmail.com
www.koss.net.pl

z 80% do 20% maksymalnej dawki. Często podaje się również odległość dystalnego spadku dawki pomiędzy 90% a 10% dawki maksymalnej. Na rycinie 6 zamieszczono ilustrację poszczególnych parametrów, którymi standardowo opisywana jest krzywa rozkładu głębokościowego wiązki protonowej.

Ostateczny kształt zmierzonej krzywej Bragga jest zależny od kilku elementów, tzn. silnie zależy od parametrów samej wiązki protonowej, tj. jej rozmycia energetycznego, rozproszeń generowanych w obrębie układu formowania wiązki oraz geometrii i konfiguracji samego stanowiska pomiarowego. Znaczący wpływ na kształt krzywej może mieć również rodzaj i geometria detektora użytego do pomiarów. Znajomość efektów fizycznych występujących podczas oddziaływania cząstek naładowanych z ośrodkiem jest kluczowym elementem prawidłowego określania parametrów wiązki wykorzystywanej w radioterapii protonowej. To z kolei pozwala na bezpieczne, z punktu widzenia precyzji napromieniania, leczenie pacjentów poddawanych procedurze protonoterapii w Centrum Cyklotronowym Bronowice Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. 

Piśmiennictwo

1. W.D. Newhauser, R. Zhang: *The physics of proton therapy*, *Physics in Medicine & Biology*, 60, 2015.
2. A. Hrynkiewicz: *Człowiek i promieniowanie jonizujące*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001.
3. T. Jevremovic: *Nuclear Principles in Engineering*, New York: Springer Science+Business Media LLC, 2005.
4. F.H. Attix: *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
5. M. Gotein: *Radiation Oncology: A Physicist's – Eye View*, Springer Science and Business Media, 2008.
6. M.F. Moyers, S.M. Vatnitsky: *Practical Implementation of Light Ion Beam Treatments*, Madison, Wisconsin, Medical Physics Publishing, 2012.
7. H. Bethe: *Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie*, *Ann. Phys.*, 1930, 325-400.
8. F. Bloch: *Zur Bremsung rasch bewegter Teilchen beim Durchgang durch Materie*, *Ann. Phys.*, 285-320, 1933.
9. J. Pluta: *Metody Fizyki Jądrowej w Środowisku, Przemysle i Medycynie*, Politechnika Warszawska, 2003, <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w2/segment4/main.htm>.
10. H. Paganetti: *Proton Therapy Physics*, CRC Press, 2012.
11. J. Kempe, I. Gudowska, A. Brahme: *Depth absorbed dose and LET distributions of therapeutic H1, He4, Li7, and C12 beams*, *Medical Physics*, 34, 2007.
12. H.G. Paretzke: *Advances in energy deposition theory*, *Advances in Radiation Protection and Dosimetry in Medicine*, 1980, 51-73.
13. International Commission on Radiation Units & Measurements Report 78, *Prescribing, Recording and reporting proton-beam therapy*, Oxford University Press, 2007.
14. B. Gottschalk: *Passive Beam Spreading in Proton Radioation Therapy*, Cambridge, 2004.
15. H. Paganetti: *Proton Therapy Physics*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2019.
16. N. Mojszeszek, Rozprawa doktorska, [w:] *Dozymetria i kontrola jakości skanującej wiązki protonowej na stanowisku gantry*, Kraków, 2018.
17. ICRU Reports, *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles*, ICRU, 1993.
18. M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, J. Chang: *ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions*, *Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2005, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>.