

ბნჩთ-ის როლი თანამედროვე რადიაციულ მედიცინაში (მოკლე მიმოხილვა)

შ. მაქაცარია

საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო
shio.makatsaria@gmail.com

მიღებულია 2020 წლის 15 ნოემბერს

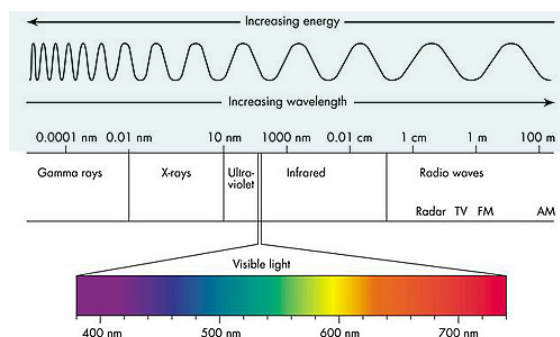
ანოტაცია

მოკლედ არის მიმოხილული ბორის მიერ ნეიტრონის ჩაჭერის თერაპიის (ბნჩთ) როლი თანამედროვე რადიაციულ მედიცინაში. კერძოდ, მოყვანილია ნეიტრონჩამჭერი ბორის ^{10}B იზოტოპის კონცენტრაციის ის მნიშვნელობები, რაც საჭიროა ამ თერაპიის რეალიზებისათვის.

1. შესავალი

დღეს რადიაციის გამოყენება მედიცინაში გავრცელებული და რუტინულია. 100 წლის წინ დანერგილი დიაგნოსტიკური რენტგენოლოგია, ბირთვული მედიცინა და სხივური თერაპია უკვე განვითარების საკმაოდ მაღალ საფეხურზე არიან ასული და თანამედროვე მედიცინის ყველა განხრის აუცილებელ ატრიბუტებად განიხილებიან.

მაიონებელი გამოსხივება მრავალ სარგებელს იძლევა, მაგრამ მას ზიანის მოტანაც შეუძლია. ამიტომ სამედიცინო პრაქტიკაში მისი გამოყენება გულისხმობს რისკი / სარგებელი ფარდობის ინფორმირებულ შეფასებას. ეს განსჯა კი, თავის მხრივ, მოითხოვს არამხოლოდ სამედიცინო ცოდნას, არამედ – რადიაციის, როგორც ფიზიკური ფენომენის, არსის გაგებასაც. რადიაცია არის ენერგიის ნაკადი, რომელიც მოდის წყაროდან ელექტრომაგნიტური ტალღების ან ნაწილაკების კონის სახით.



სურათი 1. ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრი.

ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრის შედარებით დაბალსიხშირულ დიაპაზონს შეესაბამება რადიო- და მიკროტალღები, რომლებიც საზოგადოდ ადამიანისათვის უვნებელია. მზის მიერ გამოსხივებული ხილული სინათლის სპექტრი

მოქცეულია შედარებით გრძელ ინფრაწითელ და შედარებით მოკლე ულტრაიისფერ ტალღებს შორის. ულტრაიისფერი დიაპაზონის გარეთ გამოსხივების ქვანტებს საკმარისი ენერგია აქვთ იმისათვის, რომ ელექტრონები ამოგლიჯონ ატომებიდან. ეს არის იონიზების სახელით ცნობილი პროცესი. **სურათზე 1** წარმოდგენილია ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სპექტრის დიაპაზონების კლასიფიკაცია ტალღის სიგრძის მიხედვით.

ჩვენ ყველანი ვიღებთ მაიონებელი დასხივების მცირე დოზებს კოსმოსიდან, ატმოსფეროდან და კლდოვანი მასივებიდანაც კი. მედიცინაში მაიონებელი გამოსხივების სათანადო ათვისების არაერთი პროგრამაა შემუშავებული, რამაც შეიძლება გააფართოოს მისი ადამიანზე სასარგებლო ზემოქმედების არეალი. ამასთან გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ ცოცხალი არსებების შემადგენელ ატომებთან ურთიერთქმედებისას ამ ფორმის რადიაცია პოტენციურად დამაზიანებელია ჯანმრთელი ქსოვილის, გენებისა და დნმ-ისათვის. შესაბამისად, კონტროლირებადი და მართვადი რადიაციული ზემოქმედება და რისკი / სარგებელი ფარდობის შეფასება ყოველთვის უნდა უსწრებდეს წინ კლინიკური გადაწყვეტილების მიღებას.

არამაიონებელი რადიაცია არის ისეთი გამოსხივება, რომელსაც აქვს ენერგია, საკმარისი მოლეკულაში ატომების გადასადგილებლად ან მათი რხევების გამოსაწვევად, მაგრამ არა – მათგან ელექტრონების მოსაწყვეტად. ეს ნიშნავს, რომ ასეთი დასხივებისას იონები არ წარმოქმნება. მაგრამ სწორედ იონების მაღალი ფიზიკური და ქიმიური აქტივობა განაპირობებს ცოცხალ ქსოვილზე დასხივების ზემოქმედების ეფექტურობას. ამიტომაც, რომ როგორც დიაგნოსტიკური, ისე – თერაპიული მიზნებისათვის თანამედროვე მედიცინა რადიაციის მაიონებელ ფორმებს იყენებს.

წინამდებარე სტატიაში მოკლედ აღწერილია მაიონებელი რადიაციის ძირითადი ფორმები. კერძოდ, დახასიათებულია ბორის მიერ ნეიტრონის ჩაჭერის თერაპია (ბნჩთ), როგორც რადიაციულ მედიცინის ერთერთი პერსპექტიული მიმართულება. მიმოხილვის შედეგისას ვეყრდნობოდით ისეთ წყაროებს, როგორიცაა [1 – 4].

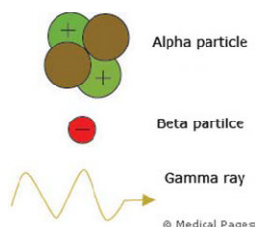
2. მედიცინაში გამოყენებული მაიონებელი რადიაციის სახეები

მაიონიზებული რადიაცია არის გამოსხივების (ნაწილაკების ან ტალღების სახით) ტიპი, რომელსაც აქვს საკმარისი ენერგია, რომ ატომებში ძლიერად ბმული ელექტრონები ამოაგდოს მათი ბირთვის გარშემო მოძრაობის ორბიტებიდან და ამით შექმნას დადებითად დამუხტული იონები. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მაიონებელი გამოსხივება არის ნებისმიერი სახის გამოსხივება, რომელსაც შეუძლია ორბიტალური ელექტრონის ამოგლეჯა ატომიდან.

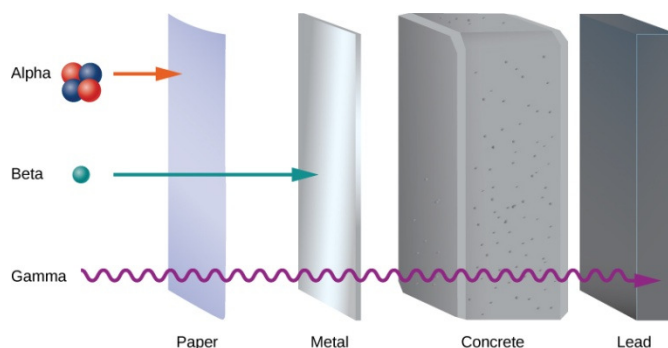
საზოგადოდ, იონიზაცია არის პროცესი, რა დროსაც სტაბილური ნეიტრალური ატომი ან მოლეკულა კარგავს ან ჩაიჭერს ელექტრონებს, რითაც იძენს ელექტრულ მუხტს. ატომს ან მოლეკულას ელექტრული მუხტით ეწოდება იონი, რომლისათვისაც, როგორც წესი, დამახასიათებელია შესაბამისი ნეიტრალური ატომის ან მოლეკულისგან განსხვავებული ელექტრონული თვისებები და ქიმიური აქტივობა.

ადამიანის ორგანიზმში იონიზაციის ეფექტებმა შეიძლება გამოიწვიოს უჯრედების სტრუქტურული ცვლილებები, რადგანაც მაიონებელ გამოსხივებას აქვს საკმარისი ენერგია იმისათვის, რომ შეძლოს ელექტრონის გადაადგილება ატომში მისი ორბიტიდან. ასეთი მაიონებელი გამოსხივება მიიღება გარკვეული ატომბირთვების რადიოაქტიური დაშლის პროცესში. რადიაციის წყაროს წარმოშობის მიხედვით,

ერთმანეთისაგან განასხვავებენ ბუნებრივ და ხელოვნურ რადიოაქტივობებს. რადიოაქტიური დაშლის დროს გამოყოფილი მაიონებული გამოსხივების ძირითადი ტიპებია ალფა- და ბეტა-ნაწილაკები და გამა-სხივები (სურათი 2). მოკლედ დავახასიათოთ თითოეული მათგანი წყაროებისა და მასალათა გამჭოლუნარიანობის (სურათი 3) თვალსაზრისით.

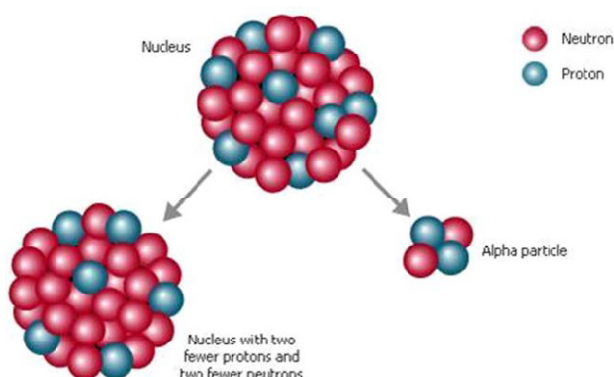


სურათი 2. მედიცინაში გამოყენებული მაიონებული რადიაციის ძირითადი სახეები: ალფა- და ბეტა-ნაწილაკები და გამა-სხივები.



სურათი 3. ალფა- და ბეტა-ნაწილაკებისა და გამა-სხივების შედარებითი გამჭოლუნარიანობა.

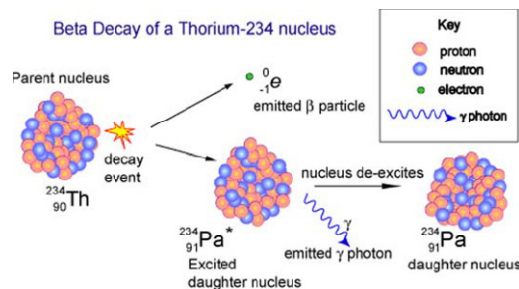
ალფა-გამოსხივებამ განსაკუთრებული პოპულარობა მოიპოვა ელემენტარული ნაწილაკების ფიზიკის განვითარების ადრეულ ეტაპზე, როდესაც ის გამოიყენებოდა სხვადასხვა სამიზნის დასაბომბად. ამათგან ყველაზე ცნობილი ექსპერიმენტი ერნესტ რეზერფორდმა ჩაატარა 1917 წელს, რასაც ატომის სტრუქტურის აღმოჩენა მოჰყვა.



სურათი 4. ალფა-ნაწილაკის წარმოქმნა მძიმე რადიოაქტიური ბირთვის დაშლის პროცესში.

მისი შემადგენლობიდან – ორი პროტონი და ორი ნეიტრონი – გამომდინარე, ატომური მასშტაბებით ალფა-ნაწილაკი ანუ ჰელუმის ^4He იზოტოპის ბირთვი დიდი ზომისაა. ჩვეულებრივ, ის გამოიყოფა მხოლოდ ყველაზე მძიმე რადიოაქტიური ბირთვების, მაგალითად, ურანის, აქტინიუმისა და რადიუმის დაშლის დროს

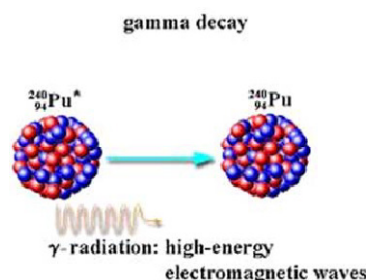
(სურათი 4). მიუხედავად მაღალი ენერგიის და ძლიერი მაიონებელი თვისებებისა, ალფა-ნაწილაკების მასა და ზომა ისეთია, რომ ნივთიერებაში მოხვედრისას ისინი საკმაოდ ადვილად კარგავენ ენერგიას შედარებით მოკლე მანძილებზე და, შესაბამისად, საკმაოდ ადვილად ჩერდებიან, მაგალითად, ქაღალდის ფურცლის მეშვეობითაც კი.



სურათი 5. თორიუმის ^{234}Th იზოტოპის ბირთვის ბეტა-დაშლის პროცესი.

ისტორიულად ბეტა-ნაწილაკები ეწოდათ მცირე ზომის, სწრაფად მოძრავ, უარყოფითად დამუხტულ ნაწილაკებს, რომლებიც გამოიყოფოდა ატომის ბირთვიდან მათი სპეციფიკური რადიოაქტიური დაშლის დროს (სურათი 5). შემდგომში გაირკვა, რომ ისინი წარმოადგენენ ელექტრონებს. ბეტა-დაშლის პროცესში ელექტრონის ნაცვლად შეიძლება გამოყოფოდეს მისი ანტინაწილაკი – პოზიტრონი.

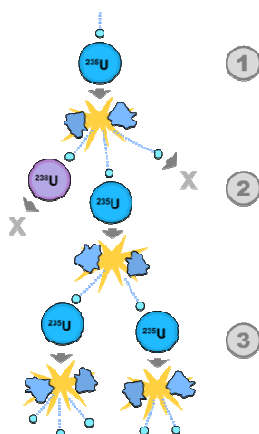
ბეტა-ნაწილაკების ემისია ხდება მაშინ, როდესაც ატომის ბირთვში ნეიტრონებისა და პროტონების რაოდენობათა ფარდობა საკმაოდ მაღალია. ასეთ შემთხვევებში თითოეული ჭარბი ნეიტრონი გარდაიქმნება პროტონად და ელექტრონად. პროტონი რჩება ბირთვში, ხოლო ელექტრონი მაღალი ენერგიით ამოიტყორცნება. ბეტა-ნაწილაკების გამომსხივებლებიდან უფრო მეტად გავრცელებულია ნახშირბადისა და სტრონციუმის, შესაბამისად, ^{14}C და ^{90}Sr იზოტოპების შემცველი წყაროები. ბეტა-ნაწილაკები უფრო გამჭოლია, ვიდრე ალფა-ნაწილაკები, მაგრამ უფრო ნაკლები ზიანის მიმყენებელი იონიზაციის უბნის უფრო დიდ ფართობზე გადანაწილების გამო. ბეტა-ნაწილაკებს შეუძლიათ უფრო დიდი მანძილის გავლა ჰაერში, მაგრამ მათ ადვილად აჩერებს თუნდაც ალუმინის თხელი ფირფიტა.



სურათი 6. პლუტონიუმის ^{240}Pu იზოტოპის ბირთვის ბეტა-დაშლის პროცესი.

გამა-სხივებს, რომლებიც გამოიყოფა როგორც რადიოაქტიულ დაშლისას (სურათი 6), ისე – ბირთვულ აფეთქებების დროს, აქვთ უმცირესი ტალღის სიგრძე და, შესაბამისად, ქვანტის უდიდესი ენერგია ელექტრომაგნიტური სპექტრის სხვა, პრაქტიკაში გამოყენებად, დიაპაზონებთან შედარებით. ალფა- და ბეტა-ნაწილაკებისაგან განსხვავებით, რომლებსაც აქვთ ენერგია და უძრავობის მასა, გამა-სხივები „სუფთა“ ენერგიაა. გამა-ქვანტების ენერგია ისე მაღალია, რომ მათ

შესაკავებლად საჭიროა რამდენიმეშრიანი ან სქელი ტყვიის ანდა ბეტონის ფენები. გამასხივებს შეუძლიათ პრაქტიკულად შეუფერხებლად გაიარონ ადამიანის სხეულში და ამ დროს დააზიანონ ქსოვილი და დნმ.



სურათი 7. ნეიტრონული ჯაჭვური რეაქცია ურანის ^{235}U იზოტოპის ბირთვის მოწაწილობით.

ნეიტრონების წყაროებიც ბირთვული რეაქციებია. კერძოდ, ატომურ ენერგეტიკაში ნეიტრონული ჯაჭვური რეაქციები გამოიყენება. მაგალითად, ნეიტრონის ურთიერთქმედებით ურანის ^{235}U იზოტოპის ბირთვთან (სურათი 7) მიიღება 3 ნეიტრონი, რომელთაგანაც 2 ურთიერთქმედებს სხვა ^{235}U ბირთვებთან და ა.შ. – ჯაჭვურად იზრდება ნეიტრონების რიცხვი ბირთვული რეაქტორის აქტიურ ზონაში.

ნეიტრონული გამოსხივება მაიონებელი რადიაციის განსაკუთრებულ ფორმას წარმოადგენს. საქმე ისაა, რომ, ერთი მხრივ, ნეიტრონს, დამუხტული ალფა- და ბეტა-ნაწილაკების მსგავსად, აქვს უძრაობის მასა, მაგრამ, მეორე მხრივ, უმასო გამა-ქვანტის მსგავსად, ის ელექტრულად ნეიტრალურია. ელექტრონეიტრალურობის გამო ნეიტრონს არ შეუძლია ატომის პირველადი იონიზაცია ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებით მისგან ელექტრონის მოწყვეტით. სამაგიეროდ ის შედის ძლიერ ურთიერთქმედებაში ატომის ბირთვთან და იწვევს მეორად იონიზაციას პროტონის ამოგლეჯით ბირთვიდან.

ეს პროცესი განსაკუთრებით აქტიურად მიმდინარეობს ცოცხალ ქსოვილში, რადგანაც, როგორც ცნობილია, უჯრედი ძირითადად წყლისაგან შედგება და, შესაბამისად, ძალზე მაღალია მასში წყალბადის კონცენტრაცია. წყალბადის ატომის ბირთვი კი სხვა არაფერია, გარდა გამხოლოებული პროტონისა. ამიტომ ნეიტრონული გამოსხივების სამედიცინო მიზნით გამოყენებისას აუცილებელია მისი სპეციფიკის გათვალისწინება: ელექტრონეიტრალურობის წყალობით ნეიტრონული ნაკადი ადვილად გაივლის ადამიანის სხეულის გარე ფენას და იწვევს შინაგანი ორგანოების პროტონირებას, რაც მათი მძიმე დაზიანების მიზეზი შეიძლება გახდეს.

3. როგორ განვსაზღვროთ რადიაცია

ადამიანების დასხივების წყაროები შეიძლება დავყოთ ორ დიდ კლასად – ბუნებრივ და ხელოვნურ წყაროებად. აქ არ განვიხილავთ ბირთვული ობიექტების მომსახურე პერსონალის დასხივებას და, მით უმეტეს, ისეთ ექსტრემალურ სიტუაციებს, როგორიცაა მოსახლეობის დასხივება ბირთვული იარაღის გამოყენების შემთხვევაში.

იმ დასხივების თითქმის ნახევარი, რომელსაც ვიღებთ, მოდის გარემოდან. დედამიწის ქერქში აღმოჩენილი მრავალი ელემენტი ასხივებს, მათ შორის, ურანი,

რადიუმი, პოლონიუმი, თორიუმი და კალიუმი. ზემოქმედების დონე დამოკიდებული იქნება ადგილობრივი ნიადაგისა და ქანების ტიპზე. დასხივების კიდევ ერთი ბუნებრივი წყაროა კოსმიური გამოსხივება: დედამიწა მუდმივად განიცდის მზის, სხვა ვარსკვლავებისა და მთელი სამყაროდან მომდინარე რადიაციის ზემოქმედებას. ბუნებრივი რადიაციის ყველაზე მავნე წყაროა რადონი – უფერული და უსუნო გაზი, რომელიც წარმოიქმნება რადიუმის დაშლის შედეგად. ეს ელემენტი თითქმის ყველა ქანსა და ნიადაგშია. რადონის გაზი შენობებში აღწევს ბზარებიდან და სხვაგვარი ღიობებიდან იატაკებსა და კედლებში.

ქვეყნებში, განვითარებული კლინიკური სექტორით, ადამიანებზე რადიაციული ზემოქმედების მეორე ნახევარი განპირობებულია სამედიცინო წყაროებით. ამგვარ რადიაციულ დაზიანებათა უმეტესობა მოდის სტანდარტულ რენტგენულ გამოკვლევასა და კომპიუტერული ტომოგრაფიით დაავადებათა დიაგნოსტიკაზე.

პრაქტიკაში გამოსხივებას ოთხი ერთმანეთისაგან განსხვავებული, მაგრამ ურთიერთდაკავშირებული სიდიდით ზომავენ. ესენია:

- რადიოაქტივობა, რაც გულისხმობს ნივთიერებისაგან გამოთავისუფლებული მაიონებული გამოსხივების სიდიდეს;
- ექსპოზიცია, რომელიც ზომავს რადიოაქტიურობის სიდიდეს გამოსხივების ატმოსფერულ ჰაერში გავრცელებისას;
- შთანთქმული დოზა, რომელიც აღწერს რადიაციის რა რაოდენობას შთანთქავს ობიექტი (მაგალითად, პაციენტის სხეული რადიაციული თერაპიის პროცედურის განმავლობაში); და
- ეფექტური დოზა, რომელიც ითვალისწინებს როგორც შთანთქმულ დოზას, ისე – მოცემული ტიპის გამოსხივების სამედიცინო ეფექტებს.

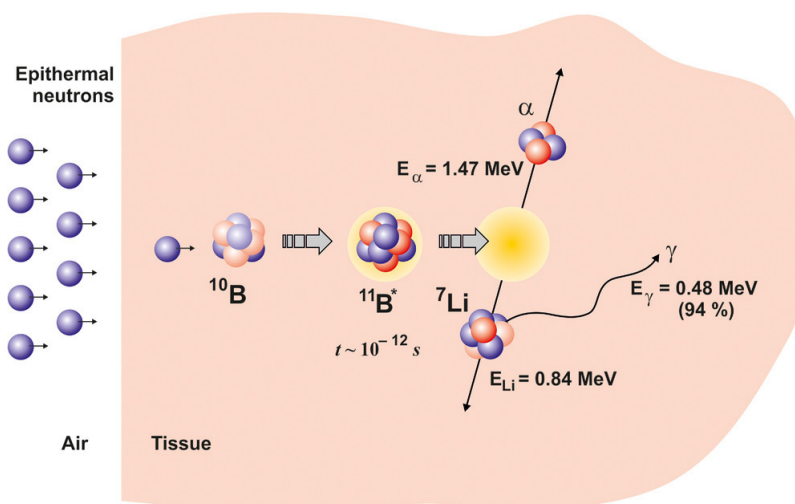
4. ბორის მიერ ნეიტრონის ჩაჭერის თერაპიის განვითარება

იმის გათვალისწინებით, რომ კიბოთი ავადობა და სიკვდილიანობა კვლავ რჩება შედარებით მუდმივ მაღალ დონეზე, მიგვაჩნია, რომ კიბოს ალტერნატიული თერაპიები და, კერძოდ, ბორის მიერ ნეიტრონის ჩაჭერის თერაპია – ბნჩთ (Boron Neutron Capture Therapy – BNCT) შემდგომ განვითარებას იმსახურებს.

ნეიტრონის არსებობა პირველად დაადასტურა ჩედვიკმა 1932 წელს, რომელმაც შეისწავლა ბერილიუმიდან და ბორიდან გამოყოფილი გამჭოლი გამოსხივების თვისებები, როდესაც ისინი პოლონიუმის დაშლით მიღებული ალფა-ნაწილაკებით იბომბებოდნენ. სულ მალე ნეიტრონის აღმოჩენიდან რამდენიმე მკვლევარმა ერთმანეთს შეადარა ნეიტრონებისა და რენტგენის სხივების გავლენა ნორმალურ და სიმსივნურ ქსოვილებზე. ამ კონტექსტში უნდა აღინიშნოს, რომ ნეიტრონებით დასხივებისას სიმსივნური ქსოვილი უფრო მეტ დოზას იღებს, ვიდრე – ნორმალური.

დღეს ბნჩთ-ის მიმართ ინტერესის ბუმი, რაც ორი ფაქტორით არის განპირობებული. ერთი მხრივ, შეიქმნა საკმაო სიმძლავრისა და სათანადო ენერგეტიკული სპექტრის მქონე პორტატული ნეიტრონული წყაროები, რაც საშუალებას იძლევა, რომ ეს თერაპიული პროცედურა განხორციელდეს ჩვეულებრივ კლინიკაში და აღარაა აუცილებელი სპეციალური კლინიკის მოწყობა ბირთვული რეაქტორის უშუალო სიახლოვეს. მეორე მხრივ, მიღებულია ბორის მაღალი კონცენტრაციის შემცველი ნაწარმები, რომლებიც კიბოთი დაზიანებულ უჯრედებამდე ^{10}B იზოტოპის ეფექტურად გადამტანებს წარმოადგენენ.

ბნჩთ ემყარება ^{10}B ბირთვის მიერ ე.წ. სითბური (ნელი) ან ეპისითბური ნეიტრონის ჩაჭერასა და მისი გახლეჩის $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ რეაქციას (სურათი 8). ^{10}B ბირთვები, ჩაიჭერენ რა ნეიტრონებს, თითქმის მყისიერად ასხივებენ ალფა-ნაწილაკს ^4He , ლითიუმის ბირთვს ^7Li და γ -ქვანტს დაბალი ენერგიის წრფივი გადაცემით – ეწგ (Linear Energy Transfer – LET).



სურათი 8. ბორის ^{10}B იზოტოპის ბირთვის მიერ ეპისითბური ნეიტრონის ჩაჭერა და მისი შემდგომი გახლეჩის რეაქცია.

ბორის ^{10}B იზოტოპის ბირთვის მიერ შთანთქმული ნეიტრონების ენერგია დაბალია: < 0.5 ევ, მაგრამ $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + ^4\text{He}$ რეაქციის შედეგად გამოსხივებული ალფა-ნაწილაკი და ლითიუმის ბირთვი იძენენ მაღალ ენერგიას (გახლეჩილი ბირთვის შინაგანი ენერგიის ხარჯზე) და იმავდროულად ხასიათდებიან მაღალი ეწგ-ით, შესაბამისად, 150 და 175 კევ/მკმ. ამ ნაწილაკების თავისებურება ისაა, რომ ისინი უზრუნველყოფენ ენერგიის მაღალ გადაცემას ძალიან მოკლე მანძილზე, < 10 მკმ, რომელიც შესადარისია უჯრედის დიამეტრთან.

ბნჩთ-ის ეფექტურობა და უსაფრთხოებაც დამოკიდებულია ^{10}B ატომების სიმსივნურ უჯრედებში ლოკალიზებულობის ხარისხზე, რადგანაც ამ ტიპის მეთოდების გამოყენებით ნადგურდება მხოლოდ ^{10}B ატომების საკმაოდ კონცენტრაციის შემცველი უჯრედები. ივარაუდება, რომ ნებისმიერი უჯრედი, რომელიც მათ არ შეიცავს, პრაქტიკულად დაცულია მაღალი ინტენსივობის ნეიტრონული გამოსხივების ზემოქმედებისაგან. ქსოვილში ნეიტრონმშთანთქმელი ცენტრების მინიმალური კონცენტრაცია, რომელიც საჭიროა ლეტალური დაზიანებისათვის ბნჩთ-ში დაახლოებით არის $1 \cdot 10^9$ ^{10}B ატომი/უჯრედზე ანუ 20 მკგ/გ ქსოვილზე.

ამრიგად, ბნჩთ-ის ეფექტურობა უფრო მეტად სიმსივნურ არეში ^{10}B ატომების მიწოდებით განისაზღვრება, ვიდრე ნეიტრონული სხივის მახასიათებლებით. შესაბამისად, დღეს ბორის მიმწოდებელი აგენტების შექმნაზე მუშაობა ძალზე აქტიურია. ბორის ნაერთის მისაწოდებლად, ჩვეულებრივ, გამოიყენება ინტრავენური ინფუზია, რასაც მოსდევს დასხივება სითბური ნეიტრონებით. ^{10}B ატომების შემცველი აგენტების სპეციფიკურად სიმსივნურ უჯრედებში მიწოდების გამო, ნეიტრონული სხივები შერჩევით ანადგურებენ სიმსივნურ უჯრედებს, მაშინ როდესაც მიმდებარე ნორმალური ქსოვილის სტრუქტურა თითქმის უცვლელი რჩება.

ქვემოთ მოყვანილია ბორის მიწოდების აგენტებისადმი წაყენებული აუცილებელი მოთხოვნები:

- ბორის კონცენტრაცია სიმსივნეში უნდა იყოს ~ 20 მკგ $^{10}\text{B}/\text{გ}$ ქსოვილში;
- ბორის კონცენტრაციების ფარდობები სიმსივნე / ნორმალური ქსოვილი T/N) და სიმსივნე / სისხლი T/B უნდა იყოს არანაკლებ 3;
- სისხლისა და ნორმალური ქსოვილების სწრაფი გაწმენდა;
- დაბალი სისტემური ტოქსიკურობა; და
- სიმსივნეში ბორის ატომების კონცენტრაციის მუდმივობა ბნჩთ-პროცედურის განმავლობაში.

პირველი თაობის ბორის ნაერთებს, რომლებიც გამოიყენებოდა 1950- და 1960-იან წლებში ჩატარებულ ბნჩთ-ის კლინიკურ კვლევებში, წარმოადგენენ ბორის მჟავა და მისი ნაწარმები. მეორე თაობის ნაერთებს განეკუთვნებიან, მაგალითად, ნატრიუმის მერკაპუნტეკაჰიდრო-კლოდო-დოდეკაბორატი ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$), ნატრიუმის ბოროკაპტატი (BSH) და, აგრეთვე, ბორშემცველი ამინომჟავა (L)-4-დიჰიდროქსი-ბორილფენილალანი ან ბრონოფენილალანინი (BPA). აღსანიშნავია, რომ ამ ნაერთებს ამჟამად იყენებენ მრავალ კლინიკურ კვლევაში.

5. შემაჯამებელი შენიშვნები

ბნჩთ აერთიანებს ორ ფუნდამენტურ მიდგომას: ქიმიოთერაპიასა და რადიოთერაპიას. მიუხედავად იმისა, რომ სიმსივნის უჯრედებში ბორის ნაერთების მაღალი კონცენტრაცია ხელს უწყობს ნეიტრონული დასხივების ეფექტურობას, კონკრეტულ სიტუაციაში ბნჩთ შეიძლება ვერ განხორციელდეს ბორის მიმწოდებელი ნივთიერებების არასპეციფიკურობის, სისხლში ბორის შემცველი აგენტების არსებობისა და არადეკვატური გამოსხივების დოზის გამო.

რა თქმა უნდა, ამ ტიპის თერაპია ჯერ კიდევ არ არის ფართო მასშტაბით ხელმისაწვდომი სიმსივნის მკურნალობისათვის და მისი გამოყენების ჩვენებები შეზღუდულია. დღეისათვის ბნჩთ გამოყენებულია შემდეგი სიმსივნეების სამკურნალოდ: მულტიფორმული გლიობლასტომა, ყელის სიმსივნე, მრავალფოკალური ჰეპატოცელულური კარცინომა, განმეორებადი ფილტვის სიმსივნე, ბრტყელუჯრედოვანი კარცინომა, სანერწყვე ჯირკვლის კარცინომა, სარკომა, განმეორებითი ავთვისებიანი მენინგიომა და პაჯეტის დაავადება.

დამოწმებანი

- [1] Д. Мур. Основы и применения трибоники, 2018, Москва, Мир, 122-125.
- [2] T. Xie, Zh. H. Zhou, Zh. X. Xu, J. W. Yu, M. H. Jiao. Characteristics of the transfer film and tribological properties of oxide / PTFE composites. Adv. Mater. Res., 2013, 631/632, 172-175.
- [3] S. R. Yu, H. X. Hu, Y. B. Zhang, Y. H. Liu. Effect of transfer film on tribological behavior of polyamide 66-based binary and ternary nanocomposites. Polymer Int., 2008, 57, 3, 454-462.
- [4] M. H. Cho. The role of transfer film and back transfer behavior on the tribological performance of polyoxymethylene in sliding. J. Mech. Sci. Technol., 2009, 23, 8, 2291-2298.