

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Zdravotně sociální fakulta

## **Výhody a nevýhody terapie protony a karbonovými ionty**

Bakalářská práce

Autor: Jan Ježek  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Friedo Zölzer, Ph.D.  
Datum odevzdání práce: 4. 5. 2009

## **Advantages and disadvantages of proton and carbon ion therapy**

### **Abstract**

This bachelor thesis deals with modern radiotherapy method, the so-called hadron therapy. The paper describes its principal characteristics, evaluates its advantages and disadvantages and gives reasons for its application in treating oncological diseases. At the same time this method is compared with the most frequently used treatment processes (megavoltage radiotherapy). The paper gives an overview of the most important hadron centers in the whole world, gives information on their activities and speculates about possibilities of building a similar center in the Czech Republic. The research based on specialized literature is completed by a questionnaire survey that polls the level of awareness in the professional public on the issue dealt with in this paper.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně na základě vlastních zjištění a pomocí literatury, kterou uvádím v závěru své práce.

.....  
Jan Ježek

V Českých Budějovicích, 30. 4. 2009

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. RNDr. Friedovi Zölzerovi, Ph.D. za pomoc a rady, které mi poskytoval v průběhu zpracování práce. Dále bych rád vyjádřil své díky Ing. Veronice Vávrové, Ph.D. za konzultace k metodice empirické části. Rovněž děkuji všem respondentům, kteří se zúčastnili mého dotazníkového šetření a také Nemocnici České Budějovice, a.s. za vstřícnost a umožnění dlouhodobé praxe na Radioterapeutickém oddělení, jmenovitě Mgr. Lubomíru Franclovi a kolektivu radiologických asistentů. Také bych chtěl poděkovat nemocnicím, které mi poskytly informace do dotazníkového šetření.

.....  
Jan Ježek

V Českých Budějovicích, 30. 4. 2009

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě.

.....  
Jan Ježek

V Českých Budějovicích, 30. 4. 2009

## OBSAH

<b>I.</b>	<b>Úvod do problematiky</b>	<b>7</b>
<b>II.</b>	<b>Cíle a metodika zpracování</b>	<b>9</b>
<b>III.</b>	<b>Literární rešerše</b>	<b>10</b>
	<i>1. Ukotvení základních pojmů</i>	10
	<i>1.1 Částice</i>	10
	<i>1.2 Typy záření</i>	11
	<i>1.3 Léčba onkologických onemocnění</i>	11
	<i>2. Konvenční radioterapie</i>	14
	<i>2.1 Terapie pomocí vysokoenergetického X záření, záření gama a elektronů</i>	14
	<i>3. Hadronová terapie</i>	15
	<i>3.1 Charakteristika metody, technické specifikace a důvody užití</i>	15
	<i>3.2 Terapeutické využití hadronové terapie</i>	21
	<i>3.3 Výhody a nevýhody hadronové terapie</i>	22
	<i>3.4 Významná hadronová centra</i>	25
	<i>3.5 Situace v ČR, predikce vývoje</i>	28
<b>IV.</b>	<b>Empirická část – Průzkum v oblasti informovanosti odborné veřejnosti o možnosti využití metody terapie protony a karbonovými ionty</b>	<b>30</b>
	<i>1. Cíl průzkumu</i>	30
	<i>2. Hypotézy</i>	30
	<i>3. Metodika</i>	31
	<i>4. Charakteristika průzkumu</i>	33
	<i>5. Výsledky a diskuze</i>	34
<b>V.</b>	<b>Závěry a doporučení</b>	<b>48</b>
<b>VI.</b>	<b>Seznam literatury</b>	<b>50</b>
<b>VII.</b>	<b>Klíčová slova</b>	<b>51</b>
<b>VIII.</b>	<b>Seznam tabulek, grafů a obrázků</b>	<b>52</b>
<b>IX.</b>	<b>Přílohy</b>	<b>53</b>

*Je svět nemocný? Bylo by to ohromné - mohli bychom doufat, že se uzdraví.  
(Gabriel Laub)*

## **I. ÚVOD DO PROBLEMATIKY**

Léčba nádorových onemocnění je a vždy bude živým a aktuálním tématem, neboť se týká více či méně každého jednotlivce v populaci. Nádorová onemocnění jsou druhou hlavní příčinou úmrtí v České republice, roční přírůstek nových případů je v řádech desetitisíců a vyléčit se podaří ani ne polovina z nich. Tato neutěšená fakta apelují na nutnost se této problematice intenzívně věnovat, a to jak na vědecko výzkumné, tak na prakticko aplikační úrovni.

Standardními a běžně používanými metodami léčby zhoubných nádorových onemocnění jsou metody chirurgické, radioterapeutické a chemoterapeutické, které jsou využívány většinou v kombinaci. Ovšem i při zapojení výše uvedených, zůstává řada případů neléčitelných, navíc nejvíce používaná radioterapie má své vedlejší účinky na pacienta.

Slabinou některých tradičních způsobů ozařování je fakt, že poměrně značně zasahují zdravou tkáň. I z tohoto důvodu se odborníci z oblasti medicíny a fyziky začali intenzívně zabývat alternativními druhy ozařování, které mohou pomoci v léčbě lidí, pro které jsou klasické metody radioterapie nevhodné.

V konvenční radioterapii se využívá ozařování pomocí fotonových nebo elektronových svazků, jejichž zdrojem bývají obvykle lineární urychlovače (dříve kobaltové ozařovače). Nejvíce energie je těmito částicemi předáváno tkáním ležícím na povrchu těla nebo těsně pod ním, s rostoucí hloubkou průniku do tkáně dochází u fotonů po mírném počátečním nárůstu k exponenciálnímu poklesu předávané energie. Místa ležící před cílovou oblastí jsou jednotlivými svazky ozářena zpravidla více než vlastní ložisko. Určité radiační zátěži jsou vystavena i místa ležící za cílovou oblastí. Ozařováním z více směrů a např. použitím metody IMRT, lze vliv těchto nepříznivých skutečností snížit, avšak pouze do určité míry. Pro mnohé nádory ležící v těsné blízkosti

kritických orgánů vede radioterapie konvenčními svazky k vysokému riziku nepřijatelného poškození těchto struktur, takže ji nelze úspěšně aplikovat.

Naproti tomu předávají protony a lehké ionty (nabitě hadrony) největší část své energie v úzké oblasti tzv. Braggova vrcholu. Tkáně ležící před tímto maximem jsou zasaženy výrazně menší dávkou, tkáně ležící za oblastí dobehu částic nejsou vystaveny prakticky žádné radiační zátěži. Protony i lehké ionty jsou navíc charakterizovány minimálním bočním rozptylem. Díky fyzikálním vlastnostem těchto částic lze oblast maximální předávané dávky velmi přesně vymezit.<sup>1</sup>

Při uplatnění laického pohledu na fakta uvedená v předchozích dvou odstavcích, by se mohlo zdát, že všechna pozitiva jsou na straně terapie protony a karbonovými ionty. To by byl pohled velice zúžený a nezobrazoval by situaci reálně. Používání této metody terapie není možné přeceňovat. Uvádí se, že úspěšnost léčby je možné její aplikací zvýšit pouze do 10 %. Dalším úskalím hadronové radioterapie je také cena speciálního urychlovače, který svazky iontů či protonů vysílá. Vybudování léčebného centra se svými pořizovacími náklady blíží řádově miliardám korun. Vzhledem k tomu, že v současném zdravotnictví finance chybí a stávající centra klasické radioterapie jsou převážně vybavena zastaralými přístroji, budou zřejmě peněžní prostředky proudit po menších dávkách do většího počtu již vybudovaných pracovišť.

V zahraničí je situace odlišná. Ve světě existuje několik center hadronové terapie. Nejdále jsou v této léčbě ve Spojených státech, kde vzniklo první pracoviště již před osmnácti lety. V Evropě také existuje několik center a v nejbližších letech se očekává otevření dalších. Budoucnost léčby hadronovou radioterapií v České republice je ovšem nejistá. O vybudování takového moderního onkologického centra se ale dosud nerozhodlo. Pokud by bylo možné takový projekt zafinancovat, mohlo by se pracoviště otevřít nejdříve během příštích 5-ti let.

Jedním z hlavních cílů předkládané bakalářské práce je zhodnotit na základě studia odborné literatury a provedení dotazníkového šetření u odborné veřejnosti (radiologičtí asistenti, onkologičtí lékaři) podmínky pro zřízení hadronového centra v České republice, včetně analýzy hlavních výhod a nevýhod terapie protony a karbonovými ionty.

---

<sup>1</sup>Hadronová radioterapie. [cit 24. 10. 2008]. Dostupný z [www: http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=3](http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=3). ISBN neuvedeno.



## II. CÍLE A METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Hlavní cíle této práce byly stanoveny již v podkladu pro zadání bakalářské práce, a to následovně:

1. Na základě studia odborné literatury popsat hlavní výhody a nevýhody terapie protony a karbonovými ionty.
2. Komparovat hadronovou metodu a její využití s ostatními metodami radioterapie.
3. Zjištění informovanosti odborné veřejnosti (radiologičtí asistenti, onkologičtí lékaři) o možnosti využití metody terapie protony a karbonovými ionty.

Byla stanovena základní pracovní hypotéza: „V ČR existují vhodné podmínky ke zřízení hadronového (centra využití terapie protony a karbonovými ionty)“.

Důvodem volby tématu práce a následných cílů byl fakt, že hadronová terapie je moderní a velmi zajímavou metodou léčby onkologických onemocnění a rovněž i to, že ucelený přehled na toto téma v české literatuře zatím chybí. Mou snahou bylo v této práci shromáždit co největší množství relevantních informací, ať už z domácích či zahraničních zdrojů, a uspořádat je do logického celku. Informace pro zpracování literární rešerše jsem získal z odborné literatury (monografie, vysokoškolská skripta, odborné knihy), odborných časopisů a zdrojů dostupných v síti internet. Nutno podotknout, že většina materiálů, ze kterých jsem čerpal, je ze zahraničních pramenů, kde je zkoumané problematice věnována mnohem větší pozornost než v ČR. Zpracování literární rešerše bylo tedy poměrně náročné. Veškeré zdroje jsou uvedeny v závěru bakalářské práce v seznamu literatury.

Pro zpracování literární rešerše jsem přistoupil k přípravě a následné realizaci dotazníkového šetření, jehož cílem bylo zjistit informovanost cílové skupiny o možnostech využití hadronové terapie v praxi. Shromážděné dotazníky jsem zpracoval statistickými metodami a v závěru své práce jsem shrnul veškeré získané poznatky a zformuloval vlastní návrhy a doporučení.

### III. LITERÁRNÍ REŠERŠE

#### 1. Ukotvení základních pojmů

Pro další zpracování této kapitoly bylo nutné vymezit základní pojmy, které budu ve své práci používat. Pro větší přehlednost jsou pojmy sdruženy do tematických celků.

##### 1.1 Částice

**Elementární částice hmoty** (protony, neutrony, elektrony) jsou stavebními kameny atomů. Všechny atomy (průměr atomu je řádově  $10^{-10}$  m) se skládají z atomového jádra a elektronového obalu.<sup>2</sup>

**Proton** je elementární částicí, která nese kladný náboj a je součástí jádra.<sup>3</sup>

**Foton** je elementární částice, kterou popisujeme kvantum elektromagnetické energie. Tento termín byl poprvé použit chemikem G. N. Lewisem.<sup>4</sup>

**Elektron** je záporně nabitá částice, která je součástí atomového obalu.

**Pozitron** je antičásticí elektronu.

**Hadron** je těžká částice. Těmi jsou dále například karbony zbavené vnějších elektronů, neonové, křemíkové nebo argonové ionty.<sup>5</sup>

**Karbonový iont**, jinak uhlíkový iont ( $^{12}\text{C}$ ), je těžkou částicí a její využití vykazuje zvýšení relativní biologické účinnosti (RBE).<sup>6</sup>

**Meson** je částice, která reaguje na silnou interakci a má nulový nebo celočíselný spin (vlastnost elementárních částic, vnitřní moment hybnosti). Mezony jsou tedy současně hadrony a bosony (částice mající symetrickou vlnovou funkci a celočíselný spin).<sup>7</sup>

---

<sup>2</sup> ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. s 11. ISBN 80-247-1383-7.

<sup>3</sup> ULMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika*. [cit 13.3.2009]. Dostupný z [www: http://www.astronuklfyzika.cz](http://www.astronuklfyzika.cz) ISBN nevedeno.

<sup>4</sup> PRADHAN, T. *The photon – contemporary fundamental physics*. New York: Nova Publishers, 2001. s. 3 ISBN 1-56072-928-7.

<sup>5</sup> STEEL, G., G. *Basic clinical radiobiology*. New York: Oxford University Press, 2002 s. 205. ISBN 970-0-340-80783-5.

<sup>6</sup> KRAFT, G. *Tumor therapy with heavy charged particles*. Darmstadt: Gesellschaft für Schwerionenforschung, 2000. s. 478. ISBN nevedeno.

## 1.2 Typy záření

**Záření  $\alpha$**  je proud jader helia ( $\alpha$  částic) a nese kladný elektrický náboj, má nejkratší dosah (lze ho zastavit např. i listem papíru).

**Záření  $\beta$**  je proud záporně nabitých elektronů. Někdy se rozlišuje záření  $\beta^-$  a  $\beta^+$  (kladně nabitě pozitrony). Lze ho zachytit 1 cm plexiskla nebo 6 mm hliníku.

**Záření  $\gamma$**  je elektromagnetické záření vysoké frekvence neboli proud velmi energetických fotonů. Nemá elektrický náboj, a proto nereaguje na elektrické pole. Záření  $\gamma$  se svými vlastnostmi podobá rentgenovému záření a často se používá k podobným účelům. Z uvedených typů záření je nejpronikavější.<sup>8</sup>

## 1.3 Léčba onkologických onemocnění

**Onkologie** je nauka o nádorových chorobách. Zahrnuje v sobě boj proti zhoubným nádorům v celé komplexní formě, tzn., že se zabývá nejen jejich diagnostikou a léčbou, ale též zkoumáním příčin a podstaty rakoviny.

**Klinická onkologie** jako součást celospolečenského boje proti zhoubným nádorům je soubor činností jednotlivých oborů léčebně-preventivní péče zaměřený na nádorová onemocnění. Cílem klinické onkologie je snížení výskytu zhoubných nádorů a snížení úmrtnosti na ně.<sup>9</sup>

**Tumor** je obecně charakterizován jako lokalizované zatvrdnutí nebo otok tkáně. Tento stav může být způsoben nádorovým onemocněním, ale příčinou může být i lokalizovaná infekce nebo alergická reakce. V klinice se pojmem tumor může označit jakákoliv hmatná rezistence, pro silnou asociaci pojmu tumor s nádorovými onemocněními se však toto označení již příliš nepoužívá a pojem tumor je většinou používán jen v souvislosti s nádory.

---

<sup>7</sup> MARSHAK, R., E. *Meson physics*. Michigan: Mc-Graw Hill, 1952. s. 3. ISBN neuvedeno.

<sup>8</sup> ZÖLZER, F. *Radioekologie*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, 2007. s. 2. ISBN neuvedeno.

<sup>9</sup> ZÁMEČNÍK, J. *Radioterapie – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1990. s. 13-14. ISBN 80-201-0051-2.

**Karcinom** je označením pro maligní tumor, který je v obecné rovině charakterizován abnormálním růstem buněk. Vychází z epitelu, tedy např. z vrstev kůže či sliznic, jde tedy o nádory z tkání ektodermálního či entodermálního původu.<sup>10</sup>

**Radioterapie** se podobně jako chirurgie používá s úspěchem při kurativní léčbě nádorových onemocnění v lokalizovaném stadiu. Cílem radioterapie je likvidace nádorového ložiska při co nejmenším současném poškození okolních zdravých tkání.<sup>11</sup>

**Hadronová terapie** léčba pomocí urychlených protonů či lehkých iontů. Hadronová terapie umožňuje přesné ozáření nádorového ložiska s minimálním poškozením okolních zdravých tkání, což je nezbytné pro ozařování neoperabilních nádorových ložisek, která se nacházejí v těsné blízkosti kritických tkání značně citlivých vůči záření.<sup>12</sup>

**Braggův pik** nazýváme prudký vzestup dávky na konci dráhy urychlené částice.<sup>13</sup>

**SOBP (Spread Out Bragg Peak)** je celkový rozšířený Braggův vrchol daný složením dílčích maxim.<sup>14</sup>

**Gantry** je speciální stojan, na němž bývá umístěna ozařovací hlavička. Umožňuje řízenou rotaci kolem těla pacienta pro izocentrickou radioterapii.<sup>15</sup> V případě hadronové terapie mluvíme o gantry jako o rozvodu hadronových svazků. Jsou to transportní trasy, kterými jsou částice s potřebnou energií po extrakci z urychlovače přiváděny do léčebných kabin. Více rozpracováno v kapitole 3. Hadronová terapie.

**Urychlovač** je zdrojem svazku nabitých částic.

**Lineární urychlovač** urychluje nabitě částice na lineární dráze, zcela vyhovuje léčebným i radiobiologickým požadavkům, ovšem pro požadované energie částic

---

<sup>10</sup> DOLLINGER, M., ROSENBAUM, E., M., TEMPERO, M., MULVIHILL, S., J. *Everyone's Guide to Cancer Therapy*. Riverside: Andrews McMeel Publishing, 2002. s. 4. ISBN 0-7407-1856-8.

<sup>11</sup> LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 8. ISBN neuvedeno.

<sup>12</sup> Výskyt nádorových onemocnění a úspěšnost jejich léčby. [cit 13. 3. 2009]. Dostupný z [www: http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=1](http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=1) ISBN neuvedeno.

<sup>13</sup> ZÁMEČNÍK, J. *Radioterapie – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1990. s. 273. ISBN 80-201-0051-2.

<sup>14</sup> LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 24. ISBN neuvedeno.

<sup>15</sup> ULMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika*. [cit 13.3.2009]. Dostupný z [www: http://www.astronuklfyzika.cz](http://www.astronuklfyzika.cz) ISBN neuvedeno.

v hadronové terapii je značně rozměrný a jeho pořizovací i provozní náklady jsou vysoké, proto se při tomto druhu terapie prakticky nepoužívá.

**Cyklotron** je kompaktním urychlovačem s jedním magnetem. Pro urychlování lehkých iontů na požadované energie se však cyklotron stává prakticky nepoužitelným kvůli velkému rozměru a především hmotnosti magnetu. Podrobněji v kapitole 3.1.

**Synchrotron** umožňuje urychlovat jak protony, tak lehké ionty za použití týchž magnetů, ve stejné fokusující soustavě. Dovoluje dosahovat požadované intenzity svazku urychlovaných částic, umožňuje měnit energii po krocích o velikosti přibližně 0,5 MeV. Je provozně jednoduchý a spolehlivý. Jeho nevýhodou je poněkud větší rozměr, zejména pro urychlování iontů, a s tím spojené vyšší pořizovací náklady než v případě cyklotronu.<sup>16</sup>

**IMRT** (Intensity Modulated Radiotherapy) je technika, při níž se využívá ozařování svazky o určité intenzitě a vyššího počtu ozařovacích polí.<sup>17</sup>

**LET** (linear energy transfer) lineární energetický transfer. Udává předanou energii ionizujícího záření na jednotce dráhy, která se spotřebuje na ionizaci a excitaci. Je vyjádřena v keV na dráze 1  $\mu\text{m}$ , na jednu ionizaci je vždy potřeba stejné množství energie (cca 34 eV). Pomalu letící částice vykazují vyšší hustotu ionizace než částice s vyšší energií, rychleji letící.<sup>18</sup>

**RBE** (relative biological effect) relativní biologický efekt neboli relativní biologická účinnost (RBÚ). Faktor, který vyjadřuje poměr biologické účinnosti jednoho druhu záření k jinému druhu záření. Pokud není referenční druh záření vyjádřen, považuje se za něj tradičně záření X 250 kV.

**OER** (oxygen enhancement ratio, oxygen effect ratio) je kyslíkový efekt. Poměr procenta přežití buněk v anoxickém prostředí k procentu přežití buněk v prostředí saturovaném  $\text{O}_2$ .<sup>19</sup>

---

<sup>16</sup> LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 13. ISBN nevedeno.

<sup>17</sup> Svazek s modulovanou intenzitou záření. [cit 29.4.2009]. Dostupný z [www](http://www.amedis.cz/zdravtechnika/IMRT/imrttechnika.php):

<http://www.amedis.cz/zdravtechnika/IMRT/imrttechnika.php> ISBN nevedeno.

<sup>18</sup> SPURNÝ, V., ŠLAMPA, V. *Moderní radioterapeutické metody, VI. díl, základy radioterapie*. Brno: IDVPZ, 1999. s. 95. ISBN 80-7013-267-1.

<sup>19</sup> ZÁMEČNÍK, J. *Radioterapie – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1990. s. 468-469. ISBN 80-201-0051-2.

## 2. Konvenční radioterapie

### 2.1 Terapie pomocí vysokoenergetického X záření, záření gama a elektronů

O megavoltážní terapii mluvíme tehdy, když X paprsky mají energii větší než 1 MV. Stejně tak mluvíme o megavoltážní terapii v případě gama záření o energii větší než 0,6 MV. Pokud mluvíme o energii brzdného záření 1 MV, myslíme vždy maximální energii fotonu ve svazku. Obvykle největší počet fotonů má energii poloviční nežli špičkovou. Hlavními představiteli megavoltážních ozařovacích přístrojů jsou lineární urychlovače, betatrony a kobaltové ozařovače (zastaralé).<sup>20</sup>

Celý léčebný proces radioterapie začíná diagnostikou, rozpoznáním druhu zhoubného procesu z hlediska morfologie, biologické povahy, stádia růstu atd., pomocí zdravotnické techniky a moderních diagnostických metod (CT, MR, PET, PET/CT, PET/MR, UZ a podobně). Poté se určí, pro který druh terapie je pacient vhodný. To znamená např. radikální, paliativní, chirurgickou, chemoterapii či radioterapii, popř. jejich kombinací. V případě radioterapie je pacient pozván na simulátor, což je zařízení, které slouží k lokalizaci cílového objemu a následné verifikaci všech ozařovacích podmínek. Simuluje proces následující radioterapie, je propojen výpočetním systémem se samotným ozařovačem (lineárním urychlovačem), na kterém bude následně, po verifikaci, pacient ozařován. Stanovuje se vhodná energie záření, typ záření, velikost ozařovaného pole, SSD (Source Skin Distance) a další ozařovací podmínky. Pacient je uložen do reprodukovatelné polohy, která je mu pohodlná a zároveň je optimální pro ozáření. Této se docílí pomocí fixačního materiálu (komponenty Orfit, fixační masky, klíny, podložky, madla apod.). Pacientovi se zakreslí polohovací značky na kůži pro nastavení odpovídající polohy stolu, k tomu slouží výkonné lasery, které simulují osy x, y, z. Po vypracování ozařovacího plánu následuje tzv. „první nastavení“ již na lineárním urychlovači, po kterém může být pacient ozářen. Během jednotlivých frakcí ozařování se provádějí pomocí verifikačních snímků kontroly správného uložení pacienta. K tomu slouží tzv. portál, který bývá součástí všech moderních ozařovačů.

---

<sup>20</sup> SPURNÝ, V., ŠLAMPA, V. *Moderní radioterapeutické metody, VI. díl, základy radioterapie*. Brno: IDVPZ, 1999. s. 73. ISBN 80-7013-267-1.

### 3. *Hadronová terapie*

#### 3.1 *Charakteristika metody, technické specifikace a důvody užití*

V současné době se intenzivně rozvíjí léčba těžkými částicemi – hadrony. Jsou to částice, které navzájem působí prostřednictvím silné jaderné interakce. Mezi hadrony užívané v radioterapii patří protony, neutrony a lehké ionty. Tato terapie se začala rozvíjet z důvodu překlenutí fyzických a biologických limitů konvenční radioterapie. Důležitou roli při výzkumu této metody hrál Robert Wilson a výsledky uvedl ve své vědecké stati, kterou publikoval již v roce 1946.

Nové urychlovače umožňují dosáhnout obrovské energie protonům (až GeV), aby protony pronikly do libovolného místa lidského těla. Pohyblivý systém vývodu protonu tvoří gantry o průměru i 11 m, jež rotuje kolem pacienta a vysílá tak svazek z libovolného místa a také počítačem řízené pohyblivé lůžko, pohybující se v soustavě x, y, z. Svazek protonů lze upravit jak stranově, tak i hloubkově.

V medicíně plní urychlovače dvojí úlohu – pro diagnostické účely dodává urychlovač záření, které prochází pacientem, nebo se s jeho pomocí připravují radioaktivní látky, které se aplikují pacientům.

Důvody, proč používat v terapii protony, spočívá v tom, že rozdělení dávky ve tkáni je mnohem příznivější než u fotonů a elektronů. Mají dobře definovaný dolet ve tkáni a téměř žádný rozptyl do stran. Maximum dávky se předává až na konci dráhy (Braggův pík). Za Braggovým píkem nastává prudký pokles dávky, tj. malé kolísání doletu.

Hloubka, ve které se nachází Braggův pík, záleží na počáteční energii protonů a na materiálu, kterým procházejí. Modulováním svazku pomocí absorbátorů lze vhodně umístit řadu Braggových píků do určité oblasti, a tak jimi přesně pokrýt celý objem v hloubce uložené nádorové tkáně.<sup>21</sup>

Ještě výhodnější než protony, jsou těžké ionty. Jako těžké ionty se označují všechny atomy těžší než vodík zbavené alespoň části elektronů. Ty mají ještě větší

---

<sup>21</sup> ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. s. 210 - 211. ISBN 80-247-1383-7.

rozdíl mezi energiemi, které ztrácejí během průletu tkání a v místě svého zastavení. To znamená, že v oblasti Braggova maxima vykazují ve srovnání s protony vyšší hustotu ionizace, tedy vyšší hodnotu LET, tudíž i vysokou biologickou účinnost při stejné dávce a současně dochází ke snížení kyslíkového poměru (OER), toho lze s výhodou využít u hypoxických rezistentních nádorů. Zdravá tkáň je tak zasažena ještě méně a účinky na rakovinné buňky jsou ještě více zničující. Těžké ionty jsou zhruba třikrát efektivnější než protony. Ozařování pomocí iontů může být ještě přesněji zacílené a i tím ještě šetrnější. Další výhodou může být využití speciálního svazku. Například iontů uhlíku  $^{12}\text{C}$ . U něho některé z jader při své interakci s materiálem, kterým prochází, ztratí neutron a přemění se na jádro  $^{11}\text{C}$ . To je beta plus radioaktivní a vyzáří při přeměně pozitron. Můžeme tak využít PET kameru k přesnému průběžnému sledování místa, kde se ionty zastavují a zda vše probíhá v pořádku. Zmenšuje se tak riziko chyby a snižuje riziko pro pacienta.

Využití lehkých iontů je ve srovnání s protonovými svazky technicky náročnější a náklady na urychlování a rozvod částic jsou vyšší.

Obrázek 1 *Příprava pacienta pro ozařování na urychlovači SIS v GSI Darmstadt (Vlevo je PET kamera pro průběžné sledování přesnosti a kvality ozařování.)*



Zdroj: GSI Darmstadt

Ve Výzkumném ústavu GSI (Gesellschaft für SchwerIonenforschung) v Darmstadtu byl začátkem devadesátých let dokončen velký urychlovač těžkých iontů,



kteřý umožňuje urychlovat ionty na kinetické energie, které mají velikost srovnatelnou s jejich klidovou energií spojenou s jejich hmotností. Urychlovač je zaměřen na studium srážek těžkých jader, při kterých vzniká velmi hustá a horká jaderná hmota. Na tomto studiu, které nám umožňuje poznat stav hmoty na počátku vesmíru nebo uvnitř supernov, se od počátku práce tohoto urychlovače podílí i naše skupina z ÚJF AVČR. O těchto výzkumech si můžete přečíst například zde. Proto jsem mohl při svých cestách na experimenty do laboratoře GSI sledovat, jak se v polovině devadesátých let začaly připravovat možnosti ozařování pacientů těžkými ionty. Postavil se domeček s pokoji, kde by mohli lékaři v klidu a pohodlí připravit pacienty na zákrok. Sestavilo se zařízení samotného ozařovacího pracoviště: vývod svazku a přístroje pro jeho měření, fixační lehátko, PET kamera pro průběžnou kontrolu a spousta dalších přístrojů.<sup>22</sup>

V tomto odstavci bych se rád zmínil o některých částech hadronového pracoviště z hlediska technického vybavení, příslušenství a pomůcek pro vedení a modulaci svazku nabitých částic, fixačních pomůckách a základních informacích o dozimetrii.

Klíčovou částí hadronového centra je urychlovač částic. Urychluje protony, lehké ionty, např. ionty He ( $\alpha$  – částice), Li, C, atd. Energie těchto částic musí být dostatečná k tomu, aby bylo příslušné Braggovo maximum umístěno přímo do nádorového ložiska, které se může nacházet i ve značné hloubce pod povrchem pacientova těla. Pro protony činí potřeba energie 220 – 250 MeV, v případě iontů je požadovaná energie vyšší. Existuje několik druhů. Lineární urychlovač, který je z hlediska rozměrů, pořizovacích a provozních nákladů pro hadronovou terapii spíše nevhodný. Cyklotron, kompaktní urychlovač s jedním magnetem, má nižší provozní náklady. Z principiálních důvodů se však z cyklotronu mohou urychlené částice vyvádět pouze při maximální hodnotě energie, částice s nižší energií z něj vyvést nelze. Extrahovaný svazek částic má navíc značné příčné rozměry a je rozbíhavý. Tyto skutečnosti ztěžují manipulaci s vyvedeným svazkem a velice omezují možnost použití metody aktivního skenování při ozařování nádorového ložiska. Pro urychlování lehkých

---

<sup>22</sup> WAGNER, V. *Urychlovače v boji proti nádorům*. ÚJF AV ČR a FJFI ČVUT: Praha, neuvedeno. [cit 13.3.2009]. Dostupný z [www: http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html](http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html) ISBN neuvedeno.

iontů na požadované energie se pak cyklotron stává prakticky nepoužitelným kvůli velkému rozměru a především hmotnosti magnetu.

Synchrotron umožňuje urychlovat jak protony, tak lehké ionty za použití týchž magnetů ve stejné fokusující soustavě. Dovoluje dosahovat požadované intenzity svazku urychlovaných částic, umožňuje měnit energii po krocích o velikosti přibližně 0,5 MeV. Je provozně jednoduchý a spolehlivý. Jeho nevýhodou je poněkud větší rozměr, zejména pro urychlování iontů, a s tím spojené vyšší pořizovací náklady než v případě cyklotronu.

Komerčně jsou dostupné cyklotrony, které vyrábí belgická firma IBA. Lineární urychlovače ani synchrotrony pro uvedený rozsah energií a druhů urychlovaných částic zatím komerčně dostupné nejsou.

Gantry umožňuje aplikaci urychlených částic (jejich svazků, přesně vymezených) do pacientova těla, přesněji do cílového objemu, jímž je tumorózní tkáň uložená hlouběji v těle. Jedná se o transportní trasy – trubice, které jsou schopny vést a otáčet svazek částic do přesných míst. Je to zařízení technicky náročné a cenou se srovnává samotnému urychlovači částic. Svazek se přenáší do léčebných kabin (ozařoven, kobek) jako horizontální, vertikální nebo přímo do systému (gantry), ze kterého je možno vést ho do těla v téměř v jakémkoliv směru. Přičemž přesnost je zde do 1 mm. Ozařoven může být několik, záleží na stupni technické vybavenosti pracoviště.

Otočný klínovitý disk, otočný schodovitý disk, kolimátory, speciální kompenzátory, to vše se nazývá *pasivní modulace* – technika pro úpravu doběhu a tvaru svazku. *Aktivní modulace (aktivní skenování)* – technika principiálně výhodnější. Při použití těchto dvou technik, nejsou prakticky vůbec zasaženy orgány a tkáně ležící za cílovou oblastí žádnou dávkou. Také v případě aktivního skenování, které umožňuje přizpůsobit i přední a boční okraj oblasti ozáření podle tvaru nádorového ložiska není téměř zasažena tkáň před cílovou oblastí.

Hlavním principem hadronové terapie z hlediska terapeutického využití je tvar Braggovy křivky. Jedná se o léčbu nabitými částicemi, tedy je jím možné udělit

urychlovači takovou energii, která odpovídá potřebné hloubce průniku prostředím (tkání). Pomocí magnetů lze dále měnit směr svazku těchto částic a kolimovat svazek.

Poloha Braggova maxima, ve které dochází k předávání největší energie, je v daném prostředí určena energií dopadajících částic – částice s vyšší energií pronikají do větší hloubky tkáně. Vloží-li se do dráhy svazku otočný klínovitý disk, nebo otočný schodovitý disk, jsou částice procházející jeho jednotlivými úseky rozdílným způsobem brzděny, pronikají tedy do rozdílné hloubky tkáně. Celkový rozšířený Braggův vrchol (SOBP – Spread-Out Bragg Peak) je pak dán složením dílčích maxim. Použitím disku o vhodné tloušťce lze rozšířit původně úzkou oblast maxima předané energie na potřebné rozmezí hloubek podle polohy a rozměru nádoru.

V kolmém směru svazku se pro vymezení průřezu svazku podle nepravidelného tvaru nádoru používají kolimátory individuálně vyrobené pro každého pacienta a pro každé ozařovací pole.

K přizpůsobení oblasti ozáření podle zadní stěny nádoru jsou využívány speciální kompenzátory.

Při metodě aktivního skenování je objem ložiska meandrovitým způsobem projížděn úzkým svazkem částic v několika rovnoběžných rovinách. S ozařováním se začíná v rovině nejvzdálenější od povrchu těla pacienta, po ozáření jedné roviny se změní energie svazku částic a ozařuje se další rovina, bližší k povrchu pacientova těla. Tloušťka jednotlivých rovin je dána v podstatě velikostí příčného řezu nemodifikovaného, tedy úzkého Braggova vrcholu. Při ozařování mělké vrstvy, je vždy započtena dávka, která byla již tkáni předána při průchodu svazku částic pro ozařování hlouběji uložených vrstev. Postupně je tak ozářen celý cílový objem. Lze dosáhnout značné homogenity rozložení absorbované dávky.

Filtry a absorbatory, které modelují svazek přesně pro tvar a velikost ozařovaného ložiska, jsou též důležitou součástí. Dále jsou to individuálně vytvořené matrace z radiotransparentního materiálu, které zajišťují vždy stejnou polohu pacienta při každé jednotlivé frakci ozáření, podobně jako u konvenční megavoltážní terapie. Dále se používají fixační masky pro imobilizaci hlavy. Kontrola přesného uložení pacienta se provádí pomocí laserových paprsků zaměřených na různé značky na

pacientově těle, popřípadě se provádí i ověření pozice pomocí verifikačních rentgenových snímků.

Nutno podotknout, že celková doba ozáření pacienta, která zahrnuje jeho přípravu, fixaci, verifikaci polohy cílového objemu a samotné ozáření, trvá dohromady 20-30 min. Tento čas je závislý i na poloze nádoru a celkovém stavu pacienta. Zpravidla se ozařuje frakcionovaně, jako v případě konvenční radioterapie, celková doba je 3-5 týdnů v případě ozařování pomocí protony a při ozařování ionty je doba kratší. V případě, že je též nutné ozářit větší oblast, dá se kombinovat hadronová terapie s konvenčními postupy.

Před samotným vyšetřením se provádí lokalizace cílového objemu pomocí CT, MR či jiné vhodné radiodiagnostické metody. Vytvoří se trojrozměrný obraz vyšetřované tkáně (cílové oblasti a jejího okolí) a definuje se poloha vzhledem k některým významným anatomickým bodům, nebo značkám na těle. Dále se stanovuje poloha kritických orgánů, jejichž radiační zátěž je nutno co nejvíce omezit. Vypracuje se ozařovací plán, který zajistí, aby se do nádorového ložiska vpravila potřebná dávka a v žádném z okolních orgánů nedošlo k překročení tolerančních dávek.

Dávka, která je pacientovi pomocí hadronové terapie skutečně aplikována musí souhlasit s dávkou uvedenou v ozařovacím plánu. Proto je nezbytné v průběhu ozařovacího procesu pečlivě monitorovat kvalitu svazku, tedy sledovat jeho polohu, profil, energii, homogenitu a také měřit dávku předávanou pacientovi v reálném čase, aby bylo možno ukončit ozařování ihned po dosažení předepsané dávky. Pro monitorování a dozimetrii svazku jsou používány zejména ionizační komory, polovodičové a termoluminiscenční dozimetry.<sup>23</sup>

V předchozím textu jsem uvedl dva druhy terapií pomocí záření z určité vzdálenosti, tedy teleterapií. Nutno podotknout, že existuje i speciální druh radioterapie,

---

<sup>23</sup>LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 28. ISBN neuváděno.

při kterém se zavádí zářič do bezprostřední blízkosti tumoru, nebo přímo do něho – **Brachyradioterapie.**

### 3.2 Terapeutické využití hadronové terapie

Aby ozařování mohlo splnit svou úlohu, musí být přizpůsobeno biologickým změnám, kterým podléhá ozařované prostředí v rámci svého vzniku, růstu, dozrávání a zániku. Vzhledem k tomu, že v každé, a tedy i nádorové tkáni jsou buňky v různých stádiích buněčného cyklu a navíc i v různém stupni zralosti, je nemožné docílit, aby jediná dávka záření byla maximálně účinná pro všechny buňky v nejcitlivější fázi. Z toho vyplývá, že jednorázové ozáření (aplikace celé dávky záření najednou) je pro docílení terapeutického účinku neefektivní. Proto se potřebná celková dávka dělí na několik částí. Po každé takového dávce je zničena ta část buněk, která se právě v tom čase nachází ve své nejcitlivější fázi.<sup>24</sup>

Odhaduje se, že použití ozařování protony nebo těžkými ionty je vhodné zhruba pro 5 – 10 % pacientů s rakovinou. Jde o případy, kdy se nádor nachází hluboko a je dobře lokalizován. Týká se to hlavně nádorů na mozku, kde může být každé i sebemenší poškození zdravé tkáně okolo nádoru kritické.<sup>25</sup>

Pomocí protonové terapie se provádějí například: stereotaktická jednorázová terapie pro nezhoubná onemocnění, terapie očních nádorů, léčba některých nádorů mozku (zejména chondrosarkomy ve spodině lebeční), nádorů hlavy a krku, adenokarcinomů prostaty. Ozařování protony bylo indikováno i u nádorů v blízkosti páteře a sarkomů měkkých tkání.

Svazky iontů jsou zatím nejdokonalejším nástrojem pro externí léčbu hluboko umístěných nádorů, zejména neoperovatelných nádorů v oblasti hlavy a krku.

Klinické výsledky léčby pomocí neutronů jsou velmi povzbudivé v případech některých nádorů uložených na specifických místech, např. pro léčbu nádorů slinných

---

<sup>24</sup> ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. s. 211. ISBN 80-247-1383-7.

<sup>25</sup> WAGNER, V. *Urychlovače v boji proti nádorům*. ÚJF AV ČR a FJFI ČVUT: Praha, neuvedeno. [cit 13.3.2009]. Dostupný z www: <http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html> ISBN neuvedeno.

žláz je považována za nejvhodnější (jiné oblasti: nádory, prostaty, některé nádory hlavy a krku, některé plicní nádory a sarkomy kostních či měkkých tkání).<sup>26</sup>

Podle Zámečnicka jsou indikací v protonové terapii malé ohraničené nádory, (hypofýzy, štítné žlázy, melanomy cévnatky), nádory v blízkosti rizikových orgánů (v hrudníku a v břiše), hypoxické nádory (v malé pánvi). Dávkování obvykle á 2 Gy ve 30 frakcích za 6 týdnů.<sup>27</sup>

Novým slibným směrem je léčba neutronovým záchytem na bóru. Využívá se při ní toho, že v některých nádorech, zejména v mozku, se akumulují sloučeniny bóru. Při ozáření se část neutronů zachytí v jádrech bóru a vznikají částice alfa nebo jádra lithia s velkou energií. Ty pak plně odevzdají dávku záření uvnitř nádoru a nedolétnou do zdravé tkáně.<sup>28</sup>

### 3.3 Výhody a nevýhody hadronové terapie

V čem spočívá výhoda použití hadronových částic? Je dána způsobem jakým různé částice interagují s hmotou. Lehké částice, foton nebo elektron, mohou předat při srážce s elektronem v obalu atomu velmi velkou část své energie nebo úplně změnit směr svého letu. Foton při fotoefektu veškerou a při Comptonovském rozptylu část, elektron při Coulombovském rozptylu část. Naopak těžké hadrony, jako je třeba proton, předávají při takových srážkách jen velmi malou část energie a jejich směr letu se mění jen minimálně. Je to dáno čistě zákony zachování energie a hybnosti, tedy kinematikou srážky. Jestliže srážíme v kulečnicku stejně těžké koule, předávají si i velmi velkou část energie a mohou i drasticky změnit svoji dráhu. Jestliže bychom vzali velmi těžkou kouli, měnila by při srážce s lehkými koulemi svoji dráhu minimálně. Hadrony tak při

---

<sup>26</sup> ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. s. 210-211. ISBN 80-247-1383-7.

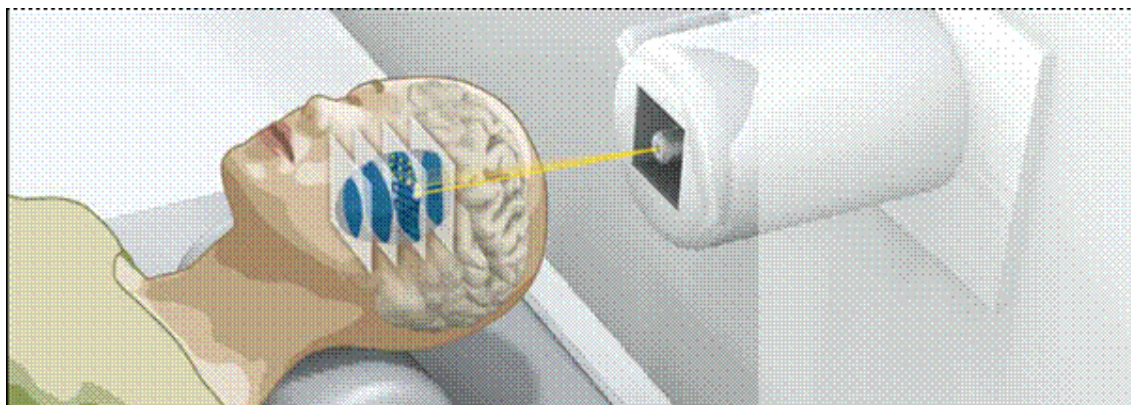
<sup>27</sup> ZÁMEČNÍK, J. *Radioterapie – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1990. s. 273-274 ISBN 80-201-0051-2.

<sup>28</sup> ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. s. 210-211. ISBN 80-247-1383-7.

průchodu tkání ztrácejí energii postupně, a pokud mají stejnou kinetickou energii, tak všechny doletí do zhruba stejného místa.

Terapie těžkými ionty má obrovské výhody hlavně u mozkových nádorů u dětí. Tyto nádory jsou velmi dobře lokalizovány a ozařování ionty je může velmi efektivně zničit s minimální zátěží pro zdravou tkáň. Obrovskou výhodou je, že léčba nemá žádné nežádoucí vedlejší účinky. Pacient nepocítuje při ozařování a ani po něm žádnou bolest a nemá žádné problémy, které by souvisely se zákrokem. Velmi důležitá je hlavně u dětských pacientů psychická příprava a vytvoření co nejpřívětivějších podmínek, které by jim pomohly překonat strach ze „studené“ techniky okolo. Proto je důležité, aby pro ně lékaři i ostatní personál vytvořili co nejpřátelštější a pohodovou atmosféru.<sup>29</sup>

*Obrázek 2 Změny směru svazku protonů nebo iontů. (Provádí se pomocí magnetického pole a dolet se mění pomocí změn jeho rychlosti. Lze tak velmi přesně cíleně ničit nádor.)*



*Zdroj: GSI Darmstadt a Klinika University v Heidelbergu*

Ztráty energie protonů jsou způsobeny tím, že jim předávají zmíněným elektronům, vyrážejí je z atomů a způsobují tak ionizaci. Velikost těchto ionizačních

---

<sup>29</sup> WAGNER, V. *Urychlovače v boji proti nádorům*. ÚJF AV ČR a FJFI ČVUT: Praha, neuvedeno. [cit 13.3.2009]. Dostupný z [www: http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html](http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html) ISBN neuvedeno.

ztrát velmi silně závisí na rychlosti. Při velmi vysoké rychlosti jsou malé. Pokud však rychlost částice klesne pod nějakou hodnotu, velice rychle narostou a částice se velmi rychle zastaví. Většinu své energii tak deponuje v jednom místě. Svazek protonu tak během svého průchodu materiálem předává jen velmi malou část energie, většinu ji odevzdá při svém zastavení. Obrovskou výhodou je také, že místo tohoto zastavení je přesně dáno energií částic a změnou energie svazku je můžeme měnit. Magnetickým polem pak můžeme měnit směr letu částice. Velmi přesně tak můžeme energii zacílit do daného místa a postupně nádor velice přesně „vypálit“ s minimálními zásahy do zdravé tkáně.

V předchozím textu jsem popisoval výhody hadronové terapie, existuje ovšem i řada nevýhod tohoto druhu terapie. Nejdiskutovanější problematikou jsou pořizovací a provozní náklady hadronového centra. Jako moderní druh terapie vyžaduje složité technické vybavení, dostatečné prostory, kvalifikovaný erudovaný personál a to vše je z ekonomického hlediska velice náročné. Vyžaduje též vysoce rozvinutý systém zdravotnictví, schopnost kooperace mezi různými vědními obory (fyzika, matematika, lékařství apod.), otevřený systém získávání informací a zkušeností a dobrou spolupráci se zahraničními výzkumnými centry v této oblasti.

Cena kompletního radiačně onkologického pracoviště s hadronovou terapií, které obsahuje pět ozařovacích místností, z nichž dvě jsou vybaveny otočným portálem a jedna je experimentální, činí přibližně 2,1 mld. Kč. Předpokládá se přitom, že navrhované centrum bude navazovat na stávající standardně vybavená radiačně onkologická pracoviště. V případě, že by toto centrum bylo budováno zcela samostatně bez návaznosti na jiná lékařská zařízení, je nutno počítat s cenou úměrně vyšší. Takto koncipované pracoviště umožní po svém dokončení ozařovat až 1200 pacientů za rok (2 pacienti za hodinu na každou léčebnou místnost). Orientační odhad ročních provozních nákladů celého komplexu včetně odpisů činí 200 mil. Kč. Vycházíme-li z této částky, bude činit cena léčby jednoho pacienta cca 170 až 200 tisíc Kč. Započteme-li pořizovací náklady onkologického centra, dosáhne tato cena přibližně 400 tisíc Kč. Tato částka je



poněkud nižší než srovnatelné odhady připravené na zahraničních pracovištích, a to zejména v důsledku nižších platů a cen za hospitalizaci a ubytování v ČR.<sup>30</sup>

Další z nevýhod je relativně nízký stupeň empirických poznatků o důsledcích léčby z hlediska ozařování pacientů (pozdní nežádoucí účinky záření) oproti získaným poznatkům u konvenční radioterapie, která se užívá již desítky let.

### 3.4 Významná hadronová centra

Hadronová terapie představuje již osvědčený způsob léčby nádorových onemocnění. Do roku 2001 bylo ve světě léčeno svazky nabitých částic více než 35 000 pacientů, z toho pomocí protonů přes 30 000 osob.

Léčba těchto pacientů probíhala z větší části na zařízeních postavených pro fyzikální výzkum, na kterých byly teprve dodatečně provedeny potřebné úpravy, aby mohla být využívána též pro radioterapeutické účely.

Od roku 1990 je v provozu první ryze medicínské centrum pro protonovou terapii ve městě **Loma Linda** (Kalifornie, USA), jehož ozařovnými již prošlo více než 6600 pacientů. Obdobné zařízení využívající svazky iontů bylo v roce 1993 uvedeno do provozu v japonské **Chibě** (Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba, HIMAC). Do provozu jsou uváděna medicínská centra **NPTC v Bostonu** (USA) a ve městech **Tsukuba** (protonové svazky) a **Hyogo** (protony i ionty) v Japonsku.

---

<sup>30</sup> LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 15. ISBN neuvедeno.

Tabulka 1 *Statistika pacientů léčených ve světě nabitými částicemi (červenec 2001)*

Pracoviště	Místo	Druh nabitých částic	Datum první léčby	Datum poslední léčby	Celkový počet pacientů	Datum odečtu
Berkeley 184	USA	p	1954	1957	30	
Berkeley	USA	He	1957	1992	2054	VI 1991
Uppsala	Švédsko	p	1957	1976	73	
Harvard	USA	p	1961		8906	VII 2001
Dubna	Rusko	p	1967	1974	84	
Moskva	Rusko	p	1969		3414	VI 2001
Los Alamos	USA	$\pi^-$	1974	1982	230	
St. Petersburg	Rusko	p	1975		1029	VI 1998
Berkeley	USA	lehké ionty	1975	1992	433	VI 1991
Chiba	Japonsko	p	1979		133	IV 2000
TRIUMF	Kanada	$\pi^-$	1979	1994	503	
PMRC Tsukuba	Japonsko	p	1983		700	VII 2000
PSI (72 MeV)	Švýcarsko	p	1984		3360	VI 2000
Dubna	Rusko	p	1987		88	V 2001
Uppsala	Švédsko	p	1989		236	VI 2000
Clatterbridge	UK	p	1989		1033	XII 2000
Loma Linda	USA	p	1990		6174	VI 2001
Louvain-La-Neuve	Belgie	p	1991	1993	21	
Nice	Francie	p	1991		1590	VI 2000
Orsay	Francie	p	1991		1894	I 2001
N.A.C.	J.A.R.	p	1993		398	I 2001
MPRI	USA	p	1993		34	XII 1999
UCSF-CNL	USA	p	1994		284	VI 2000
HIMAC Chiba	Japonsko	lehké ionty	1994		917	VI 2001
TRIUMF	Kanada	p	1995		57	VI 2000
PSI (200MeV)	Švýcarsko	p	1996		72	XII 2000

GSI Darmstadt	Německo	lehké ionty	1997		84	VI 2001
Berlín	Německo	p	1998		166	XI 2000
NCC, Kashiwa	Japonsko	p	1998		75	V 2001
Hyogo	Japonsko	p, (ionty)	2001		1	V 2001

Zdroj<sup>31</sup>

V této tabulce jsou uvedeny statistické údaje o všech pacientech léčených nabitými částicemi včetně záporných mesonů  $\pi$ . Z teoretického hlediska se mesony  $\pi$  jevíly pro léčbu nádorových onemocnění dosti perspektivně, ukázalo se však, že se s nimi nemůže v rutinní klinické praxi počítat.

Celkem bylo pomocí nabitých částic léčeno v uvedeném období (1954 – 2001) 34 440 pacientů, z toho pomocí protonů 29 852 a lehkých iontů 3 488 a pionů 1100 osob.

Pokud se blíže zaměřím na Evropu, tak mezi další významné instituce zabývající se léčbou hadrony je **Harvard Cyklotron Laboratory v Cambridge**. Tato laboratoř vznikla v roce 1948 a z počátku se zabývala pouze výzkumem v oblasti fyziky. Po roce 1961 se zabývala využitím protonů pro medicínské účely. Činnost v současné době převzalo hadronové centrum **Northeast Proton Therapy Center**. V Evropě je významným centrem hadronové terapie **Paul Scherrer Institut (PSI)**, který sídlí ve švýcarském Villigenu a má více než dvacetiletou tradici. Je silně orientován na vzdělávání a výzkum v dané oblasti. V Itálii byla v roce 1992 založena **Nadace TERA**, která sídlí v Novaře. Intenzivně se věnuje výzkumným projektům, budování hadronových center v Evropě a disponuje širokou škálou odborných publikací. Významnou institucí je dále **GSI Darmstadt** (uvádím již v kapitole Charakteristika metody). Byla založena v roce 1969 a disponuje rozpočtem přes 85 milionů EUR ročně. Zaměstnává 1050 pracovníků, včetně 300 vědců a inženýrů. Disponuje lineárním urychlovačem UNILAC, synchrotronem urychlujícím těžké ionty SIS, experimentálním

<sup>31</sup> LOKAJÍČEK, M. a kol. *Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie)*. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. s. 28. ISBN neuvedeno.

„storage ring“ ESR, separátorem částic FRS, vysokoenergetický a vysoce účinný laser PHELIX, terapeutickou ozařovací jednotku pro léčbu rakoviny. Další centra jsou rozmístěna například ve Francii či Belgii.

### *3.5 Situace v ČR, predikce vývoje*

V současné době se v naší republice ozařuje konvenčním způsobem, využívají se tradiční terapeutické metody. Radioterapie se podobně jako chirurgie u nás používá s úspěchem při kurativní léčbě nádorových onemocnění v lokalizovaném stadiu. U pokročilejších stadií se ionizující záření, případně v kombinaci s chemoterapií, využívá jako paliativní prostředek.

V současné době se radioterapie podílí (samostatně či v kombinaci s chirurgií) na úspěšné léčbě 18% všech nádorových onemocnění, tedy 40% vyléčených případů. Podíl radioterapie na léčbě nádorových onemocnění v lokalizovaném stadiu se přitom v blízké budoucnosti nepochybně zvýší, a to jak z důvodu využití nových radioterapeutických metod, tak i v souvislosti s tím, že při zavádění nových diagnostických procedur a screeningových metod bude více nádorových onemocnění odhaleno již v iniciačním stadiu, kdy jsou metody radioterapie velmi účinné a zcela nepostradatelné.

ČR patří ke státům, které se na využití moderních radioterapeutických metod začaly připravovat již před mnoha lety. Ve druhé polovině 70. let vznikla mezioborová pracovní skupina. Využití ionizujících částic v léčbě nádorových onemocnění. V posledním desetiletí se její činnost uskutečňovala na základě dohody mezi Fyzikálním ústavem Akademie věd ČR a 1. Lékařskou fakultou Univerzity Karlovy. Podíleli se však na ní odborní pracovníci z celé řady dalších pracovišť. Skupina sledovala situaci v daném oboru a systematicky připravovala vhodné podmínky pro aplikaci nových metod u nás. Předmětem zájmu této skupiny byla kromě terapie pomocí urychlených protonů nebo iontů i tzv. neutronová záchyťová terapie. Při tomto léčebném postupu se do vhodné chemické sloučeniny, která se přednostně akumuluje v nádorové tkáni, zabuduje izotop bóru  $^{10}\text{B}$ . Nádorové ložisko se pak ozáří svazkem termálních či epitermálních

neutronů. Ty jsou zachycovány bórem za vzniku jaderných fragmentů s velmi krátkým doběhem. Energie je tak předána prakticky pouze příslušné nádorové buňce. Tato metoda je v současnosti používána pro léčbu mozkových nádorů typu glioma; dosud je ve stadiu pečlivých lékařských testů. ČR se řadí k pěti státům, v nichž se již klinické testy provádějí. Na aplikaci se podílí Nemocnice Na Homolce, Onkologická klinika 1.LF UK a VFN, Ústav jaderného výzkumu a Ústav jaderné fyziky AV ČR.

Také v oblasti terapie využívající urychlených protonů a iontů koordinovala tato pracovní skupina činnost, která se rozvíjela na různých pracovištích. V roce 1996 byla zahájena příprava projektu protonového synchrotronu, který by vyhovoval parametrům potřebným pro léčebné využití. Základní studie byla dokončena v roce 2000. Mezitím byl dokončen také evropský projekt synchrotronu PIMMS, který umožňuje urychlovat protony a ionty.

Mezi významné pracoviště, které se problematikou hadronové terapie zabývají, patří v ČR Masarykův onkologický ústav na Žlutém kopci v Brně a Onkologické centrum v Olomouci.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro zřízení samostatného hadronového centra nejsou zatím v České republice vhodné podmínky. Nejvýznamnějším negativním faktorem zůstává vysoká finanční náročnost takového projektu.

#### **IV. EMPIRICKÁ ČÁST - PRŮZKUM V OBLASTI INFORMOVANOSTI ODBORNÉ VEŘEJNOSTI O MOŽNOSTI VYUŽITÍ METODY TERAPIE PROTONY A KARBONOVÝMI IONTY**

Na základě podkladu pro zadání této bakalářské práce a z důvodů doplnění teoretických poznatků uvedených v předchozí kapitole vlastním empirickým zjištěním, byl realizován dotazníkový průzkum. Záměrem bylo efektivně proniknout do dané oblasti, zmapovat názory, postoje a informovanost cílové skupiny (radiologičtí asistenti a onkologičtí lékaři). Nejprve bylo ovšem nutné co nejpřesněji formulovat takové otázky pro další šetření, které vystihují podstatu výzkumného záměru.

##### ***1. Cíl průzkumu***

Průzkum byl realizován v období od 1. 11. 2008 do 20. 4. 2009. Cílem bylo zjistit úroveň znalosti oslovených respondentů v oblasti jejich informovanosti o možnosti využití terapie protony a karbonovými ionty, resp. vyvrátit nebo potvrdit stanovené hypotézy.

##### ***2. Hypotézy***

Vlastnímu šetření předcházelo stanovení hypotéz. Ve stanovené cílové skupině chybí:

- základní povědomí radiologických asistentů o možnostech využití moderních terapeutických metod při léčbě zhoubných nádorových onemocnění,
- existuje nedostatečná informovanost onkologických lékařů o možnostech využití moderních terapeutických metod při léčbě zhoubných nádorových onemocnění,
- cílová skupina nepodporuje zřízení hadronového centra v ČR.

### **3. Metodika**

Každý průzkum má řadu zvláštností, které vyplývají z jedinečnosti povahy řešeného problému. Přesná definice problému spočívá ve všestranném osvětlení účelu průzkumu a v přesném vymezení jeho cílů. Tyto cíle byly nejprve vyjádřeny tzv. programovými otázkami, jejichž úkolem je precizní vyjádření toho, co se přesně bude zjišťovat.

Vlastnímu provedení průzkumu předcházelo sestavení dotazníku. Tento proces probíhal v následujících krocích:

#### *1. Stanovení údajů, které mají být zjištěny.*

Tento bod měl kritický význam, neboť dotazník nemohl být dobře sestaven, pokud by nebylo zcela jasné, jaké informace jsou nutné k dosažení cílů průzkumu. Bylo nezbytné znát účel a cíle šetření.

#### *2. Stanovení procesu dotazování*

V závislosti na zvolené technice dotazování byl třeba zvolit vhodný typ dotazníku.

#### *3. Hodnocení obsahu otázek*

Smyslem hodnocení jednotlivých otázek bylo posoudit, zda skutečně přinesou potřebné údaje. Bylo nezbytné brát v úvahu, zda:

- respondent otázce porozumí,
- je respondent schopen požadované informace poskytnout,
- respondent bude ochoten dané informace poskytnout.

#### *4. Stanovení typu otázek*

Dotazník obsahoval jak otevřené tak uzavřené otázky. Uzavřené otázky byly dichotomického a mnohonásobného typu. Jedna z otázek obsahovala hodnotící škálu, z důvodu převodu kvalitativních informací na kvantitativní formu.

### 5. Formulace otázek

Při samotném formulování otázek bylo třeba dbát určitých pravidel: používat jednoduchý jazyk, používat známý slovník, vyloučit dlouhé, zavádějící a nepříjemné otázky.

### 6. Stanovení struktury dotazníku

Bylo třeba uspořádat otázky v dotazníku takovým způsobem, aby tvořily logický celek. Struktura formuláře je následující:

Úvodní otázka – cílem je navázat dobrý kontakt s respondentem, probudit v něm zájem a získat jeho důvěru.

Specifické otázky – zaměřené na zjištění informací nezbytných k objasnění zkoumaného problému.

Identifikační otázky – pro zjištění vybraných charakteristik respondenta.

### 7. Formální úprava dotazníku

Dotazník musel vyhovovat těmto požadavkům:

- být přehledně uspořádán,
- nebýt příliš dlouhý.

### 8. Pretest, korekce, konečný koncept<sup>32</sup>

Informace, které byly shromažďovány a zkoumány byly externího primárního charakteru. Byla uplatněna metoda šetření a pozorování. Konkrétní technikou šetření byl dotazník. Výběr vhodné techniky závisel na povaze zjišťovaných informací a jejich potřebném rozsahu, charakteru respondentů, časových možnostech, finančních možnostech apod. Po odborných konzultacích byl sestavený dotazník předložen tzv. testovací skupině, která sestávala z 10 lidí, z důvodu zjištění případných nedostatků

---

<sup>32</sup> NOVÝ, I., SURYNEK, A. *Sociologie pro ekonomy a manažery*. Praha: Grada, 2002. s. 88. ISBN 80-247-0384-X.



respektive odstranění nejasností. Ukázalo se, že dotazník je formulován srozumitelně a nebyly žádné problémy s jeho chápáním.

Údaje, získané ze statistického šetření, bude nutné zpracovat (uvést do přehledné formy tabulek, grafů či zhustit je formou zpřehledňujících charakteristik) a vyhodnotit. Zpracování hodnot nominální proměnné do formy tabulky spočívá ve vytvoření statistické tabulky, v jejíž hlavičce (vystihuje obsah sloupců) jsou uvedeny: název proměnné, absolutní a relativní četnosti (podíl absolutní četnosti a rozsahu souboru). V legendě (sloupec vystihující obsah řádku) jsou uvedeny všechny se vyskytující obměny dané proměnné. Zpracování hodnot nominální proměnné do formy grafu spočívá ve znázornění struktury statistického souboru podle variant dané nominální proměnné obrázkem.

Vzhledem k účelu šetření byl pro zpracování dat využit program MS Excel. Pro případné rozšíření této práce na magisterském stupni studia by bylo vhodné zkoumat závislosti různých proměnných, prostřednictvím neparametrického testování. K tomu lze využít programu Statistica.<sup>33</sup>

#### **4. Charakteristika průzkumu**

Informace o postojích zástupců cílové skupiny a jejich povědomí se v praxi běžně získávají prostřednictvím průzkumu. Obecně doporučené minimum respondentů vzhledem k relevantnosti šetření je 200, optimální počet je stanoven na 500. Pro potřeby této bakalářské práce a s ohledem na charakteristiku zkoumaného problému byl tento počet stanoven na 100 osob.

V průběhu realizace průzkumu se vyskytly závažné problémy se zajištěním dostatečného počtu respondentů. Některá pracoviště dotazování odmítla, někteří pracovníci vyplnili pouze úvodní část dotazníků a při zjištění, že týká problematiky, která jim není známa, od dalšího šetření ustoupily. Jako tazatel jsem argumentoval tím, že dotazník je anonymní, nebude poskytnut nadřizným a cílem je reálně zmapovat

---

<sup>33</sup> ČERMÁKOVÁ, A., STŘELEČEK, F. *Statistika I*. České Budějovice: ZF JU, 1995. s. 15. ISBN 80-7040-126-5.

znalost oblasti. I přes dostatečný časový rozptyl šetření se mi nepodařilo zajistit určený vzorek. Pro zpracování práce jsem získal 43 dotazníků, tedy 43 % původního plánu.

Průzkum znalosti respondentů byl rozdělen na dvě etapy. První etapa představovala sběr, analýzu a komparaci informací týkajících se využití terapie protony a karbonovými ionty v České republice. Druhá etapa měla na základě průzkumu zjistit, jaký je stav úrovně znalostí dané problematiky radiologických asistentů a onkologických lékařů v českých nemocnicích. Přestože výzkum nebyl proveden na statisticky reprezentativním vzorku populace, který by dovilil výsledky zevšeobecnit na cílovou skupinu ve vybraném regionu, přesto budou, jak jsem již uvedl výše, výsledky pro zpracovávanou bakalářskou práci postačující.

Šetření probíhalo v rámci vybraných lokalit, celkem ve 4 oblastech. Výběr místa šetření byl dán především možnostmi tazatele. Nejvíce respondentů bylo ze Severočeského kraje (24, tj. 56 % z celkového počtu).

Celkový respondentský vzorek tvořilo 43 dotázaných osob, (z toho 11 mužů a 32 žen). Věková struktura respondentů představovala 3 skupiny: 18 – 30 let, 31 – 50 let a 51 let a více. Nejpočetnější zastoupení měla věková skupina 31 - 50 let (58 %).

Dalším předmětem šetření v kategorii charakteristik respondentů byla profesní orientace. Soubor byl rozčleněn na dvě skupiny: radiologický asistent, onkologický lékař. Radiologičtí asistenti logicky převažovali.

## **5. *Výsledky a diskuze***

Pro posouzení úrovně znalosti cílové skupiny o možnostech využití terapie protony a karbonovými ionty byl sestaven jednoduchý dotazník, jehož konkrétní podoba je uvedena níže.

**Otázka č. 1 Dostala se k Vám v průběhu posledních deseti let jakákoli informace týkající se hadronové terapie? (V případě, že odpovíte na tuto otázku NE, pokračujte otázkou č. 4).**

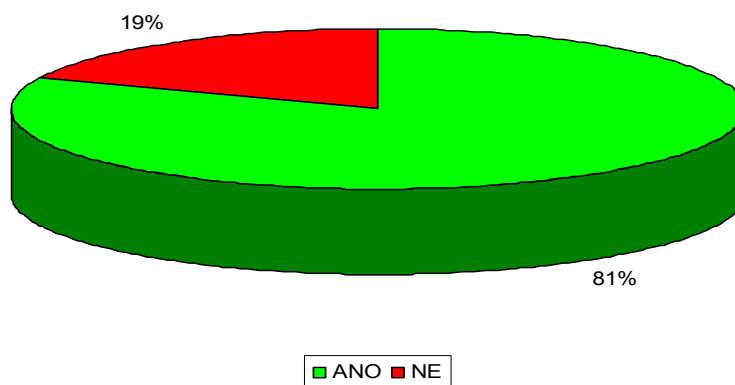
Úvodní (zahřívací) otázka měla za úkol navázat kontakt s respondentem, upoutat jeho pozornost a vzbudit v něm zájem o danou problematiku. Cílem této otázky bylo zjistit, zda respondent o uvedeném problému již někdy slyšel nebo četl. Jednalo se o uzavřenou otázku a respondent měl možnost volby z odpovědí ANO, NE. V případě, že dotazovaný uvedl zápornou odpověď, byl odkázán na otázku č. 4, neboť otázky č. 2 a 3 pro něj byly irelevantní.

Tabulka 2 Povědomí o hadronové terapii - celkem

ANO	35
NE	8

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 1 Procentuální vyjádření základního povědomí o hadronové terapii



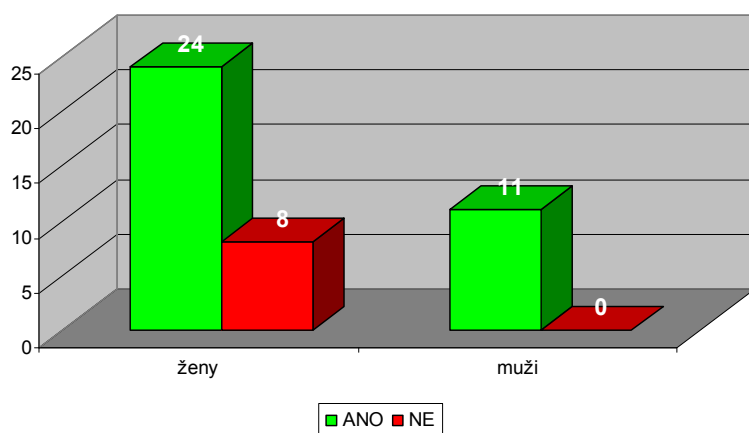
Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 3 Povědomí o hadronové terapii – rozdělení dle pohlaví

	ženy	muži
ANO	24	11
NE	8	0

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 2 Grafické znázornění tabulky č. 3



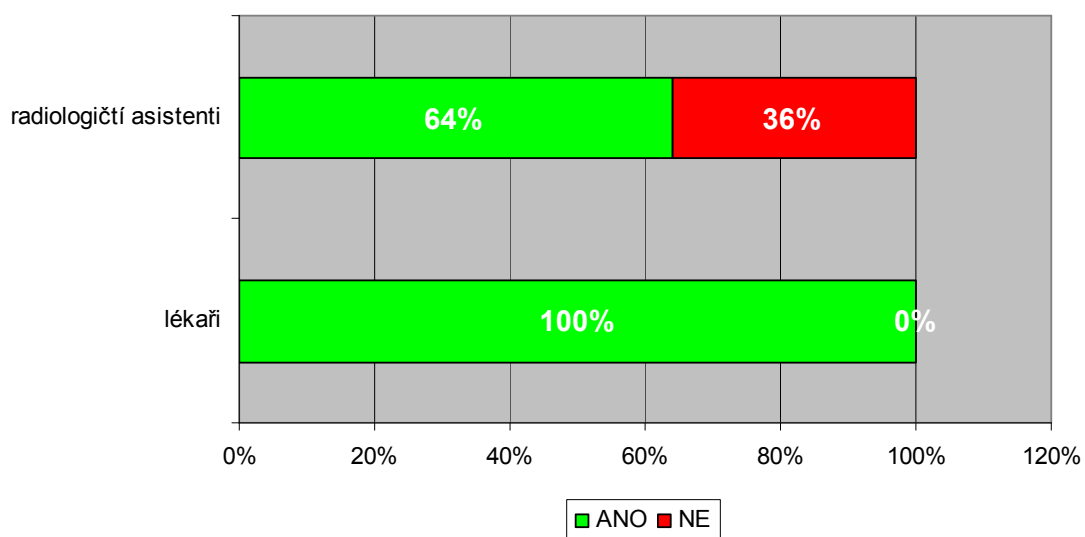
Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 4 Povědomí o hadronové terapii dle profesí

	lékaři	radiologičtí asistenti
ANO	100%	64%
NE	0%	36%

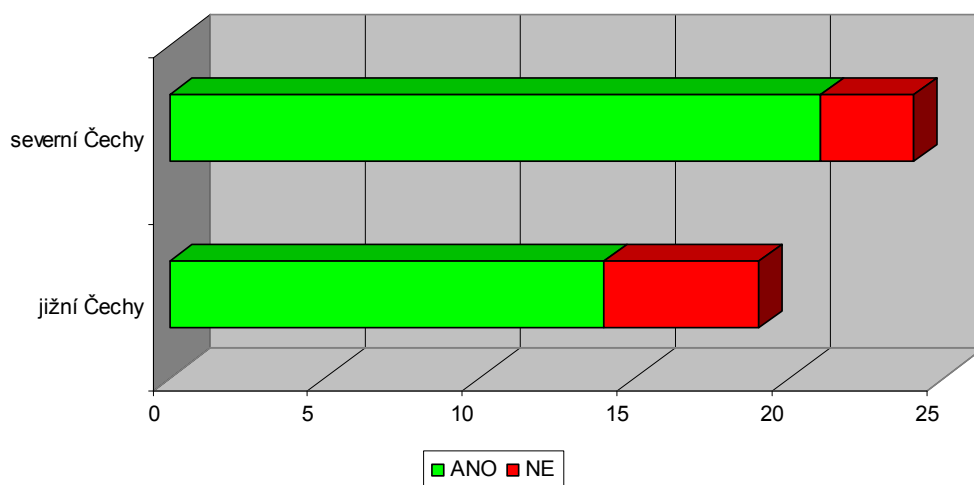
Zdroj: Vlastní šetření

Graf 3 Grafické znázornění tabulky č. 4



Zdroj: Vlastní šetření

Graf 4 Povědomí o hadronové terapii dle místa šetření



Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedeného grafického vyjádření je patrné, že většina respondentů se s termínem hadronová terapie či jakýmikoli souvisejícími informacemi již setkala. Informovanější byly jednoznačně muži, kdy kladnou odpověď uvedlo 100 % dotázaných. Znalost pojmu byla vyšší u lékařů. Větší povědomí prokázali respondenti ze severních Čech.

**Otázka č. 2 Pokud jste na předchozí otázku odpověděl(a) ANO, kde jste informace týkající se hadronové terapie získal(a)? (Zaškrtněte, prosím, tu možnost, která Vám poskytla informací nejvíce, tj. min 51 % celkového objemu informací.)**

- v rámci přípravy na výkon povolání (vzdělávací proces),
- z elektronických zdrojů (Internet),
- z odborné literatury,
- v rámci pracovního procesu (zaškolení, další vzdělávání, apod.),
- z jiného zdroje (uved'te, prosím, jakého):.....

Smyslem této otázky bylo zjistit, jaká je úroveň informačních zdrojů o dané problematice a kde tyto informace může odborná veřejnost nejnáze získat. Ze

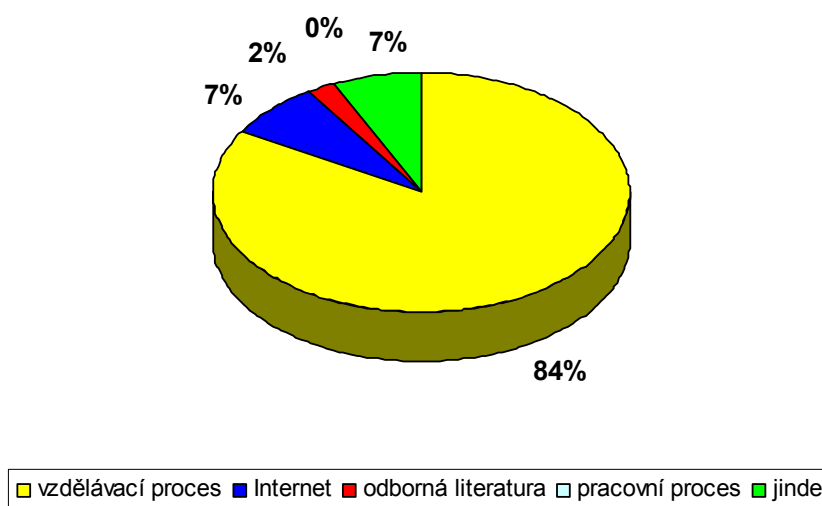
zpracovaných výsledků bylo možné například odhadnout, které informační kanály budou pro propagaci metody léčby protony a karbonovými ionty nejvhodnější.

Tabulka 5 *Informační zdroje o hadronové terapii*

vzdělávací proces	36
Internet	3
odborná literatura	1
pracovní proces	0
jinde	3

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 5 *Procentuální vyjádření dostupnosti informací dle typu zdroje*



Zdroj: Vlastní šetření

Z výsledků je patrné, že nejvýznamnější roli pro získávání informací o hadronové terapii je vzdělávací proces. Respondenti se s informací setkali v rámci studia na vyšší, nebo vysoké škole. Druhou nejčastější odpovědí byl Internet, následován možností „Jiný“, která představovala denní tisk. Zajímavým zjištěním bylo, že nikdo neuvědl, že informaci získal v rámci výkonu své profese.

**Otázka č. 3 Stručně popište, co si představujete pod pojmem hadronová terapie (terapie protony a karbonovými ionty).**

Cílem této otázky bylo zjistit povědomí o zkoumaném pojmu u odborné veřejnosti. Tato otázka měla otevřený charakter, respondent mohl své pojetí daného pojmu vyjádřit vlastními slovy. V dotazníkových formulářích byla nejčastěji zaznamenána odpověď nevím nebo nemám přesnou představu či neznám bližší informace, v čem metoda spočívá. Pouze 5 % všech respondentů uvedlo správný výklad pojmu tak, jak je uváděn v odborné literatuře. Vyšší znalost prokázali onkologičtí lékaři.

**Otázka č. 4 Máte zájem se o alternativě léčby zhoubných nádorových onemocnění pomocí terapie protony a karbonovými ionty dozvědět více? (V případě, že jste odpověděl na tuto otázku NE, pokračujte otázkou č. 7).**

- ANO, a to prostřednictvím:
- přednášek odborníků na danou problematiku, kteří mají s využitím této terapie zkušenosti,
  - odborné literatury,
  - exkurze na pracoviště, kde je hadronové terapie realizována,
  - jiného způsobu (uved'te, prosím, jakého)
- .....
- NE

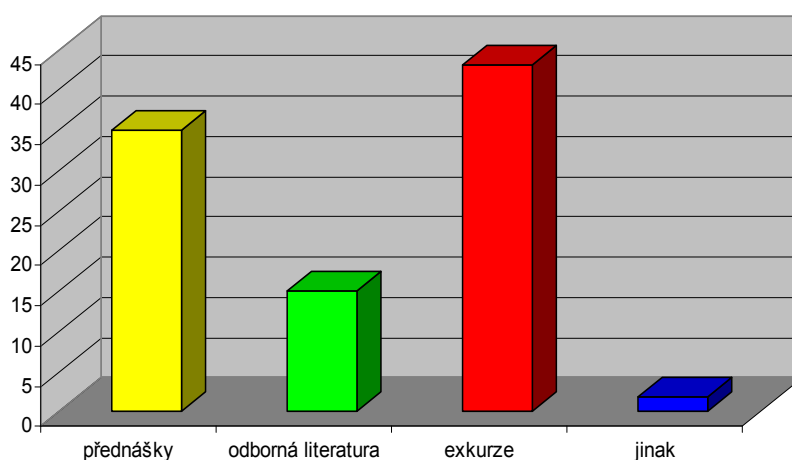
Cílem otázky bylo zjistit zájem respondentů o danou problematiku. Jednalo se o uzavřenou otázku s výběrem ze stanovených možností. Respondenti uváděli obvykle jednu až tři možnosti, kde by se chtěli o hadronové terapii dozvědět více. Absolutní četnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6 Zájem o získání informací podle druhu informačního zdroje

přednášky	35
odborná literatura	15
exkurze	43
jinak	2

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 6 Absolutní četnosti preferovaných informačních zdrojů



Zdroj: Vlastní šetření

Jak je patrné z grafu, nejvíce respondenti dávají přednost získání informací o hadronové terapii prostřednictvím exkurze na pracovišti, kde je praktikována. Nejvyšší přidanou hodnotou je osobní zkušenost s návštěvou hadronového centra. 35 respondentů označilo jako vhodný způsob, kde by chtěli získat informace, přednášky. 2 krát byla v dotazníku zaznamenána odpověď „Jinak“, nicméně ani jeden z respondentů neobjasnil způsob jak. Velmi pozitivní bylo, že 93 % všech dotázaných mělo zájem o získání informací o hadronové terapii.



**Otázka č. 5 Domníváte se, že je aktuální v České republice zřídit hadronové centrum?  
(V případě, že odpovíte na tuto otázku NE, vyplňte pouze sekci Vaše osobní údaje).**

Tato otázka byla klíčová, neboť jejím cílem bylo zjistit, zda jsou, podle respondentů, v České republice vhodné podmínky pro zřízení hadronového centra. Jednalo se opět o otázku uzavřeného charakteru, dotazovaný měl možnost volit mezi třemi stanovenými odpověďmi. V případě jiné odpovědi než ANO, došlo dotazování ukončeno.

Tabulka 7 *Názor na vybudování hadronového centra v ČR - celkem*

ANO	9
NE	29
NEVÍM	5

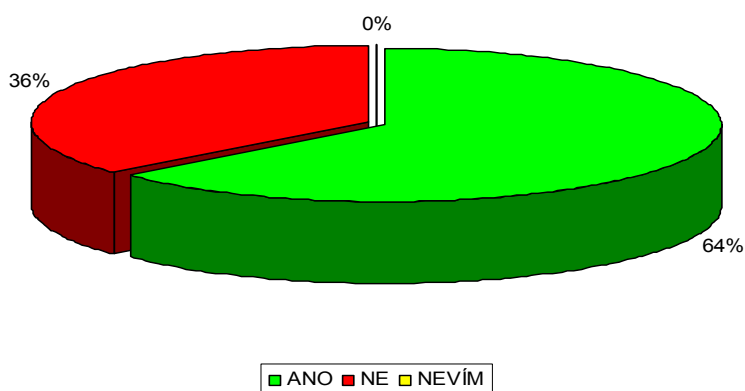
Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 8 *Názor na vybudování hadronového centra v ČR - muži*

ANO	7
NE	4
NEVÍM	0

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 7 *Názor na vybudování hadronového centra - muži*



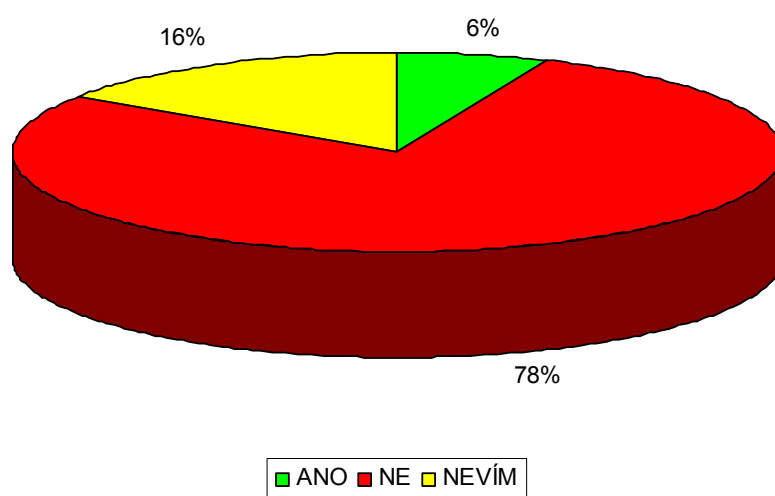
Zdroj: Vlastní šetření

Tabulka 9 *Názor na vybudování hadronového centra v ČR - ženy*

ANO	2
NE	25
NEVÍM	5

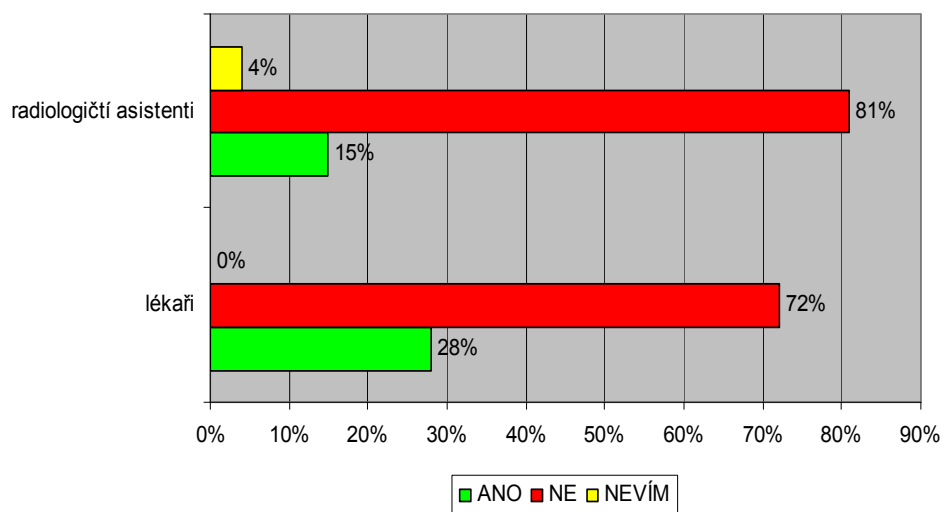
Zdroj: Vlastní šetření

Graf 8 *Názor na vybudování hadronového centra - ženy*



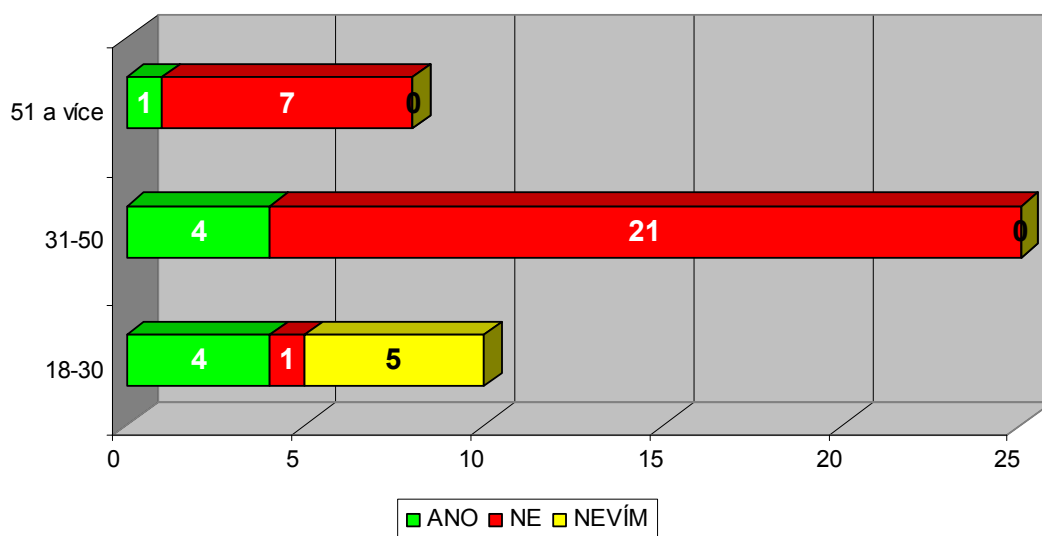
Zdroj: Vlastní šetření

Graf 9 *Názor na vybudování hadronového centra dle profese*



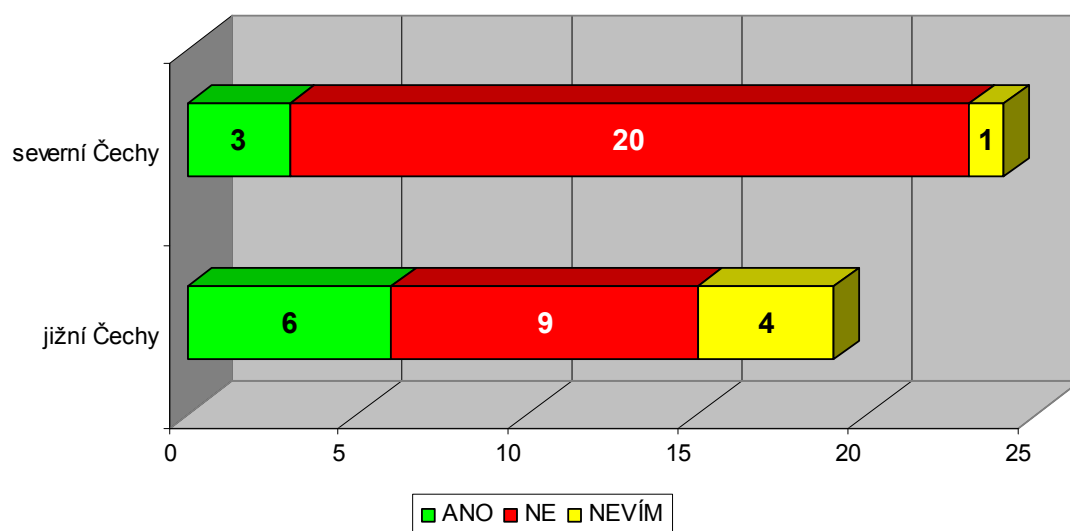
Zdroj: Vlastní šetření

Graf 10 *Názor na vybudování hadronového centra dle věkové kategorie*



Zdroj: Vlastní šetření

Graf 11 *Názor na vybudování hadronového centra dle místa šetření*



Zdroj: Vlastní šetření

Vzhledem ke klíčivosti této otázky, jsem zpracoval odpovědi respondentů podle pohlaví, profese a místa šetření. Z průzkumu jednoznačně vyplynulo, že muži hodnotili vhodnost založení hadronového centra v ČR odlišně od žen. U mužů převyšuje optimistická varianta ANO (64%), ženy možnost vybudování centra spíše zavrhnou (78% odpovědělo NE). Pokud jde o sledování proměnné u obou profesí, tak jednoznačné odpovědi podávali onkologičtí lékaři, žádní z nich nevedl, že neví, zda má smysl centrum vybudovat. Na otázku měli vyhraněný názor. Radiologičtí asistenti prokázali větší stupeň „váhavosti“, 4% dotázaných nebylo schopno určit jednoznačnou odpověď. Z grafu je opět patrné, že respondenti možnost vybudování centra spíše ztracují, jak uvádí i tabulka 7 Názor na vybudování hadronového centra v ČR – celkem (29 osob odpovědělo záporně). Zajímavé bylo vyhodnocení dat podle věkové kategorie, „starší“ ročníky byly skeptičtější než ročníky „mladší“, což je patrné z grafu, kde je možné komparovat odpovědi věkové skupiny 51 a více let s věkovou skupinou 18 – 30 let. Pokud jde o sledování proměnné z hlediska místa šetření, tak z průzkumu vyplynulo, že respondenti ze severních Čech projeví prokazatelně vyšší míru skepse. Pro potřeby diplomové práce v magisterském stupni studia by bylo zajímavé zjišťovat provázanost jednotlivých proměnných a určit jejich vzájemné závislosti.

***Otázka č. 6 Pokud jste u předchozí otázky uvedl(a) odpověď ANO, jaký ze způsobů vybudování hadronového centra považujete za lepší?***

- vybudování nového samostatného pracoviště***
- modernizací stávajících pracovišť***
- jiný (uved'te, prosím, jaký).....***

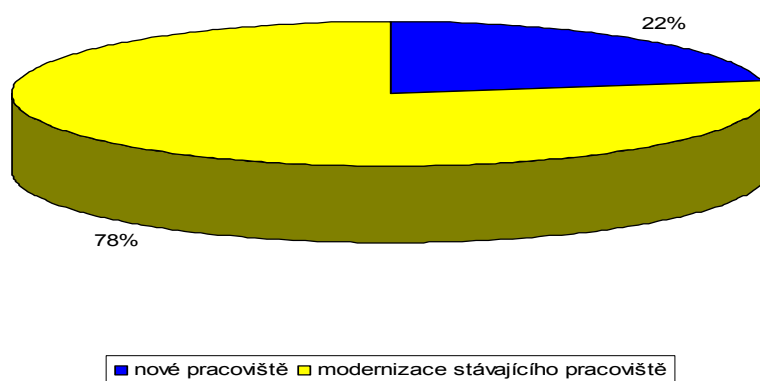
Smyslem otázky bylo zjistit preferovaný způsob zřízení hadronového centra. Jednalo se o uzavřenou otázku dichotomického typu. Třetí možnost „Jiný“ měla polouzavřenou formu. Respondent byl požádán, aby navrhl další možné způsoby, které se mu zdají být vhodné. Tuto možnost však nikdo z dotázaných nevyužil.

Tabulka 10 *Preferovaný způsob zřízení hadronového centra*

nové pracoviště	2
modernizace stávajícího pracoviště	7

Zdroj: Vlastní šetření

Graf 12 *Procentuální vyjádření možného způsobu zřízení hadronového centra - celkem*



Zdroj: Vlastní šetření

Z výše uvedené tabulky a grafu je zřejmé, že 78% dotázaných vidí větší efektivitu v modernizaci již existujících pracovišť, kde se nyní provádí konvenční radioterapeutické postupy. Pro rozšíření šetření by bylo možné dále zjišťovat důvody, které vedly zkoumané osoby k dané odpovědi, nicméně to nebylo předmětem tohoto průzkumu. Zajímavé by bylo i posouzení ekonomické výhodnosti obou investičních variant, nicméně to by pak bylo předmětem jiné diplomové práce jiného studijního oboru.

**Otázka č. 7 Využití terapie protony a karbonovými ionty v běžném provozu hodnotím z hlediska (Zakřížkujte, prosím Váš postoj v uvedené škále):**

	<i>SPIŠE NEGATIVNĚ</i>	<i>NEUTRÁLNĚ</i>	<i>SPIŠE POZITIVNĚ</i>
<i>náročnosti ovládání přístroje</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>nákladnosti na pořízení</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<i>účinnosti léčby</i>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tato otázka měla za cíl zjistit, jak zástupci cílové skupiny hodnotí využití terapie v hadronovém centru ze tří základních hledisek. Svou odpověď měli zanezt do škály. Jednotlivé možnosti byly záměrně vybrány jako reprezentativní po prostudování informací v odborné literatuře o výhodách a nevýhodách hadronové terapie. Takto vyhraněná škála dala prostor pro následné přehledné zpracování získaných dat. Ačkoli se tato otázka měla týkat pouze těch, kteří považují vhodné centrum hadronové terapie zřídit, otázku vyplnili i ti, kteří si myslí, že prozatím neexistují vhodné podmínky pro jejich vybudování. Celkem se vyjádřilo 36 respondentů.

Tabulka 11 *Hodnocení využití hadronové terapie v běžné praxi – celkem*

	pozitivně	neutrálně	negativně
náročnost na ovládání	17	7	12
pořizovací náklady	0	4	32
účinnost léčby	36	0	0

Zdroj: Vlastní šetření

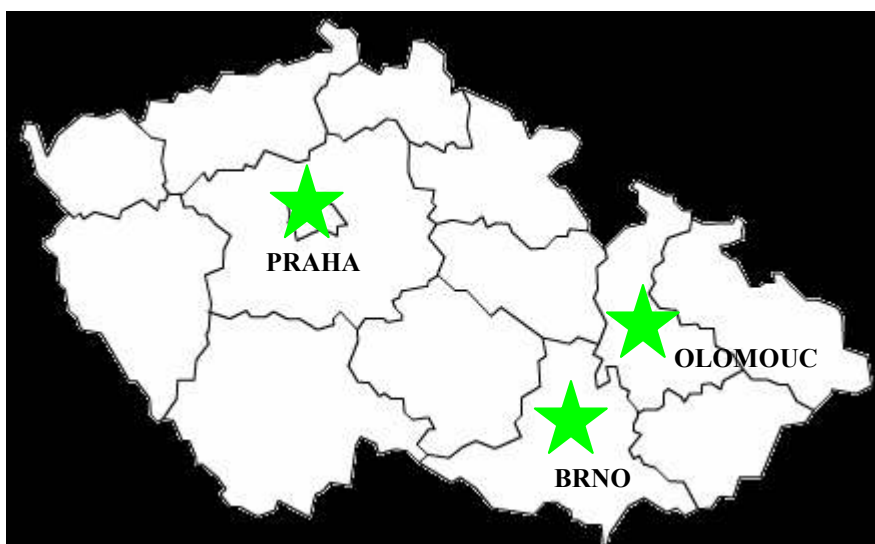
Jak je z výše uvedené tabulky patrné, respondenti vyjadřovali u jednotlivých možností zcela konkrétní postoje. Pouze 11 respondentů uvedlo neutrální postoj k určité možnosti. Z tabulky vyplývá, že pozitivní názor na účinnost léčby je jednoznačný (uvedlo 100% osob), pořizovací náklady jsou vnímány spíše negativně (89%) a náročnost na ovládání je vnímána spíše pozitivně (uvedl největší počet dotázaných), ačkoli 53% uvedlo možnost neutrálně nebo spíše negativně. Názorově výsledky této otázky v podstatě kopírují data uvedená v odborné literatuře, to ve zkratce znamená, že hadronová terapie má vysokou míru účinnosti, ale je velice nákladná.

***Otázka č. 8 Kde by, dle Vašeho názoru, bylo vhodné vybudovat hadronové centrum v ČR?***

Závěrečná otázka zjišťovala názor dotazovaných na umístění hadronového centra v České republice. Jednalo se o otevřenou otázku s možností volné odpovědi.

Na tuto otázku řada respondentů nebyla schopna odpovědět a zanechali pole nevyplněné. Mezi další místa, která byla uvedena, patřila Praha, Brno a Olomouc. Jiné lokality nebyly uvedeny, respondenti by jednoznačně vybudovali hadronové centrum ve velkých městech, což je logické a tento výsledek byl očekáván.

Obrázek 3 *Návrhy míst vhodných pro zřízení hadronového centra v ČR*



Zdroj: Vlastní šetření

Stanovené hypotézy, že: „Ve stanovené cílové skupině chybí základní povědomí radiologických asistentů o možnostech využití moderních terapeutických metod při léčbě zhoubných nádorových onemocnění a cílová skupina nepodporuje zřízení hadronového centra v ČR, byly šetřením potvrzeny. Hypotéza, že existuje nedostatečná informovanost onkologických lékařů o možnostech využití moderních terapeutických metod při léčbě zhoubných nádorových onemocnění, byla šetřením vyvrácena.

## V. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Radioterapie pomocí protonových svazků představuje osvědčenou léčebnou metodu řady nádorových onemocnění. Na základě radiobiologických experimentů se očekává, že ozařování pomocí svazků lehkých iontů přinese zlepšení léčebných výsledků v případě radioresistentních nádorů. Klinické potvrzení výhod lehkých iontů oproti protonům je dosud předmětem výzkumu. Jejich nevýhodou je vyšší technická náročnost celého zařízení, která vede k vyšším pořizovacím i provozním nákladům.

Navzdory tomuto nepříznivému faktu se předpokládá, že budou klinicky prokázány především výhody této terapie, jimiž jsou lepší dávkové rozložení než u konvenční radioterapie, díky vzestupu energie na konci dráhy letu nabitě částice – Braggově píku; šetření okolních tkání včetně kritických orgánů; možnosti ozařování i tkáňových struktur uložených hluboko v těle pacienta a z hlediska anatomie, morfologie a lokality běžnými metodami terapie neléčitelnými; využití možnosti stereotaktického ozařování, jednorázového ozařování a kombinace s konvenční radioterapií a přesná modulace svazku dle tvaru a velikosti cílového objemu.

Jak vyplynulo z literární rešerše a následně bylo potvrzeno empirickým zjištěním, v České republice prozatím neexistují vhodné podmínky pro zřízení hadronového centra, ačkoli existuje celá řada studií, které se zabývají teoretickým projektováním takové instituce.

Rovněž bylo zjištěno, že informovanost odborné veřejnosti o řešené problematice je nedostatečná, proto je třeba ji podporovat, zejména prostřednictvím profesního vzdělávání a umožnění exkurzí na zahraničních pracovištích. Uvedená hypotéza, že „V ČR existují vhodné podmínky ke zřízení hadronového (centra využití terapie protony a karbonovými ionty)“ byla vyvrácena. Stanovené cíle – „Na základě studia odborné literatury popsat hlavní výhody a nevýhody terapie protony a karbonovými ionty. Komparovat hadronovou metodu a její využití s ostatními metodami radioterapie. Zjištění informovanosti odborné veřejnosti (radiologičtí



asistenti, onkologičtí lékaři) o možnosti využití metody terapie protony a karbonovými ionty.“ byly zpracováním této práce splněny.

Uvedená práce je souborem informací o možnostech využívání hadronové terapie a může posloužit jako jeden z podkladů při přípravě projektu tvorby hadronového centra v ČR. Zároveň může posloužit jako dostupný informační zdroj pro zástupce odborné veřejnosti, kteří se chtějí o daném problému dozvědět více nebo pomoci studentům při tvorbě prací s podobnou tematikou.

## VI. SEZNAM LITERATURY

1. DOLLINGER, M., ROSENBAUM, E., M., TEMPERO, M., MULVIHILL, S., J. *Everyone's Guide to Cancer Therapy*. Riverside: Andrews McMeel Publishing, 2002. 925 s. ISBN 0-7407-1856-8.
2. ČERMÁKOVÁ, A., STŘELEČEK, F. *Statistika I*. České Budějovice: ZF JU, 1995. 167 s. ISBN 80-7040-126-5.
3. Kolektiv autorů. Hadronová radioterapie. [cit 24. 10. 2008]. Dostupný z www: <http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=3>. ISBN neuvedeno.
4. Kolektiv autorů. Výskyt nádorových onemocnění a úspěšnost jejich léčby. [cit 13. 3. 2009]. Dostupný z www: <http://www.particle.cz/medicine/index.php?art=1> ISBN neuvedeno.
5. KRAFT, G. *Tumor therapy with heavy charged particles*. Darmstadt: Gesellschaft für Schwerionenforschung, 2000. 657 s. ISBN neuvedeno.
6. LOKAJÍČEK, M. a kol. Onkologické centrum s hadronovou radioterapií (úvodní studie). Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2002. 73 s. ISBN neuvedeno.
7. MARSHAK, R., E. *Meson physics*. Michigan: Mc-Graw Hill, 1952. 378 s. ISBN neuvedeno.
8. NOVÝ, I., SURYNEK, A. *Sociologie pro ekonomy a manažery*. Praha: Grada, 2002. 191 s. ISBN 80-247-0384-X.
9. PRADHAN, T. *The photon – contemporary fundamental physics*. New York: Nova Publishers, 2001. 131 s. ISBN 1-56072-928-7.
10. ROSINA, J., KOLÁŘOVÁ, H., STANEK, J. *Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada Publishing, 2006. 230 s. ISBN 80-247-1383-7.
11. SPURNÝ, V., ŠLAMPÁ, V. *Moderní radioterapeutické metody, VI. díl, základy radioterapie*. Brno: IDVPZ, 1999. 115 s. ISBN 80-7013-267-1.
12. STEEL, G., G. *Basic clinical radiobiology*. New York: Oxford University Press, 2002. 280 s. ISBN 970-0-340-80783-5.
13. Svazek s modulovanou intenzitou záření. [cit 29.4.2009]. Dostupný z www: <http://www.amedis.cz/zdravtechnika/IMRT/imrttechnika.php> ISBN neuvedeno.
14. ULMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika*. [cit 13.3.2009]. Dostupný z www: <http://www.astronuklfyzika.cz> ISBN neuvedeno.
15. WAGNER, V. *Urychlovače v boji proti nádorům*. ÚJF AV ČR a FJFI ČVUT: Praha, neuvedeno. [cit 13.3.2009]. Dostupný z www: <http://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html> ISBN neuvedeno.
16. ZÖLZER, F. *Radioekologie*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zdravotně sociální fakulta, 2007. 16 s. ISBN neuvedeno.
17. ZÁMEČNÍK, J. *Radioterapie – učebnice pro zdravotnické školy*. Praha: Avicenum, 1990. 476 s. ISBN 80-201-0051-2.

## **VII. KLÍČOVÁ SLOVA**

Radioterapie; hadronová terapie; hadronové centrum; Braggův pík; lineární energetický přenos (LET).

### **Key words:**

Radiotherapy; hadron therapy; hadron centre; Bragg's peak; linear energy transfer (LET)

## VIII. SEZNAM TABULEK, GRAFŮ A OBRÁZKŮ

Tabulka 1 Statistika pacientů léčených ve světě nabitými částicemi	26
Tabulka 2 Povědomí o hadronové terapii celkem	35
Tabulka 3 Povědomí o hadronové terapii – rozdělení dle pohlaví	35
Tabulka 4 Povědomí o hadronové terapii dle profesí	36
Tabulka 5 Informační zdroje o hadronové terapii	38
Tabulka 6 Zájem o získání informací podle druhu informačního zdroje	40
Tabulka 7 Názor na vybudování hadronového centra v ČR – celkem	41
Tabulka 8 Názor na vybudování hadronového centra v ČR – muži	41
Tabulka 9 Názor na vybudování hadronového centra v ČR – ženy	42
Tabulka 10 Preferovaný způsob zřízení hadronového centra	45
Tabulka 11 Hodnocení využití hadronové terapie v běžné praxi – celkem	46
Graf 1 Procentuální vyjádření základního povědomí o hadronové terapii	35
Graf 2 Grafické znázornění tabulky č. 3	36
Graf 3 Grafické znázornění tabulky č. 4	36
Graf 4 Povědomí o hadronové terapii dle místa šetření	37
Graf 5 Procentuální vyjádření dostupnosti informací dle typu zdroje	38
Graf 6 Absolutní četnosti preferovaných informačních zdrojů	40
Graf 7 Názor na vybudování hadronového centra – muži	41
Graf 8 Názor na vybudování hadronového centra – ženy	42
Graf 9 Názor na vybudování hadronového centra dle profese	42
Graf 10 Názor na vybudování hadronového centra dle věkové kategorie	43
Graf 11 Názor na vybudování hadronového centra dle místa šetření	43
Graf 12 Procentuální vyjádření možného způsobu zřízení hadronového centra – celkem	45
Obrázek 1 Příprava pacienta pro ozařování na urychlovači SIS v GSI Darmstadt	16
Obrázek 2 Změny směru svazku protonů nebo iontů	23
Obrázek 3 Návrhy míst vhodných pro zřízení hadronového centra v ČR	47

## IX. PŘÍLOHY

1. Dotazník.
2. Obrazová příloha: Graf znázorňující relativní ionizaci iontů  $^{12}\text{C}$  v centimetrech zkušebního média (voda).
3. Obrazová příloha: Graf znázorňující srovnání přenosu energie u fotonů a protonů v hloubce tkáně. Dále je zde znázorněn rozšířený Braggův pík (SOBP).
4. Obrazová příloha: Znázornění závislosti relativní dávky a předané energie v určité hloubce ve vodě u elektronů, záření X a protonů.
5. Obrazová příloha: Srovnání distribuce dávek a ozáření zdravých tkání u terapie typu IMRT pomocí fotonů a u terapie typu aktivní skenování pomocí protonů.
6. Obrazová příloha: Srovnání distribuce dávky u ozařování pomocí fotonů a protonů.
7. Obrazová příloha: Transportní trasy svazku.
8. Obrazová příloha: Polohovací křeslo pro ozařování pomocí hadronové terapie (před dokončením).
9. Obrazová příloha: Výstupní okno svazku, místo pro vložení rozptylovacích disků a kolimátorů.
10. Obrazová Příloha: Gantry systém pro ozařování z libovolného směru.
11. Obrazová příloha: Gantry systém pro ozařování z libovolného směru – detail výstupní hlavice.
12. Obrazová příloha: Gantry systém pro ozařování z libovolného směru – servomotory umístěny vně.
13. Obrazová příloha: Ovladovna (řídící místnost).
14. Obrazová příloha: Aparatura pro dozimetrii svazku.
15. Obrazová příloha? Rotační klínovité disky pro pasivní rozptyl svazku.
16. Obrazová příloha: Kolimátor pro vymezení průřezu svazků podle nepravidelného tvaru nádoru individuálně vyrobený pro pacienta. Kompenzátor k přizpůsobení oblasti ozáření podle zadní stěny nádoru.
17. Obrazová příloha: Metoda aktivního skenování.

## **Příloha 1**

Vážené dámy a pánové,

dovoluji Vám touto cestou požádat o pomoc a spolupráci při realizaci datazníkového šetření u odborné veřejnosti, které se týká využití terapie protony a karbonovými ionty. Uvedené téma zpracovávám v rámci své bakalářské práce s názvem „Výhody a nevýhody terapie protony a karbonovými ionty“, a to v rámci studia na Zdravotně sociální fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích. Proším o zodpovězení následujících osmi otázek zaškrtnutím ve vyznačených polích.

Velmi děkuji za Vás čas strávený vyplněním dotazníku a jsem s pozdravem

Jan Ježek

student 3. ročníku oboru Radiologický asistent

Účelem tohoto dotazníku je zjistit povědomí cílové skupiny (radiologičtí asistenti a onkologičtí lékaři) o hadronové terapii. Při odpovídání je zachováována anonymita respondenta. Dotazník neslouží ke komerčním účelům. Odpovědi označujte křížkem, respektive uveďte slovně do vyznačeného prostoru.

1. *Dostala se k Vám v průběhu posledních deseti let jakákoli informace týkající se hadronové terapie?* (V případě, že odpovězte ne, pokračujte otázkou 6. 4).

ANO

NE

2. *Pokud jste na předchozí otázku odpověděli(ste) ANO, kde jste informace týkající se hadronové terapie získali(ste)?* (Zaškrtněte, prosím, tu možnost, která Vám poskytla informace nejvíce, tj. min 31 % celkového objemu informací)

v rámci přípravy na výkon povolání (vzdělávací proces)

z elektronických zdrojů (Internet)

z odborné literatury

v rámci pracovního procesu (záškolení, další vzdělávání, apod.)

z jiného zdroje(uveďte, prosím, jakého): .....

3. *Stručně popište, co si představujete pod pojmem hadronová terapie (terapie protony a karbonovými ionty).*

.....

4. Máte zájem se o alternativně léčby zhoubných nádorových onemocnění pomocí terapie protony a karbonovými ionty dozvědět více? (V případě, že odpovíte na tuto otázku NE, pokračujte otázkou č. 9).

- ANO, a to prostřednictvím:
- přehásk odborníků na danou problematiku, kteří mají s využitím této terapie zkušenosti
- odborné literatury
- exkurze na pracoviště, kde je hadronové terapie realizována
- jiného způsobu (uveďte, prosím, jakého)
- .....
- NE

7. Využití terapie protony a karbonovými ionty v běžném provozu hodnota z hlediska (Zakřížkujte, prosím Váš postoj v uvedené škole)

- |                                 | SPÍŠE<br>NEGATIVNĚ       | NEUTRÁLNĚ                | SPÍŠE<br>POZITIVNĚ       |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| narůstající ovládnutí přístroje | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| skladnost na pořízení           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| účinnosti léčby                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

8. Kde by, dle Vašeho názoru, bylo vhodné vybudovat hadronové centrum v ČR?

.....

9. Vaše osobní údaje

- Pohlaví  ŽENA
- MUŽ
- Věk  18 – 30 let
- 31 – 50 let
- 51 a více let
- Profese  radiologický asistent
- onkologický lékař
- Místo seřazení

Děkují za spolupráci!

5. Domníváte se, že je aktuální v České republice zřídit hadronové centrum? (V případě, že odpovíte na tuto otázku NE, vyplňte pouze sekci Údaje o respondentovi).

- ANO
- NE
- NEVÍM

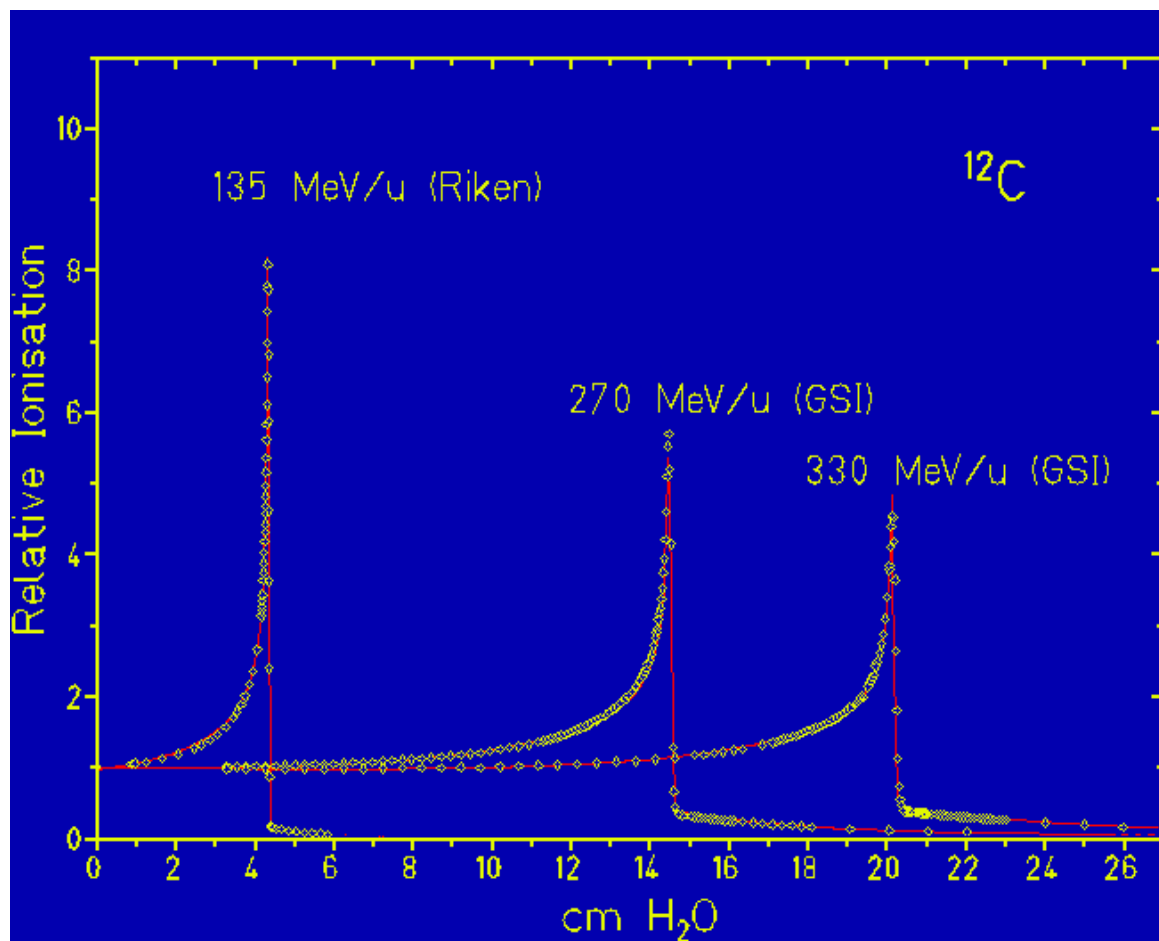
6. Pokud jste u předchozí otázky uvedl(a) odpověď ANO, jaký ze způsobů vybudování hadronového centra považujete za lepší?

- VYBUDOVÁNÍ NOVÉHO SAMOSTATNÉHO PRACoviŠTĚ
- MODERNIZACI STÁVAJÍCICH PRACoviŠT
- JINÝ (uveďte, prosím, jaký).....



## **Příloha 2**

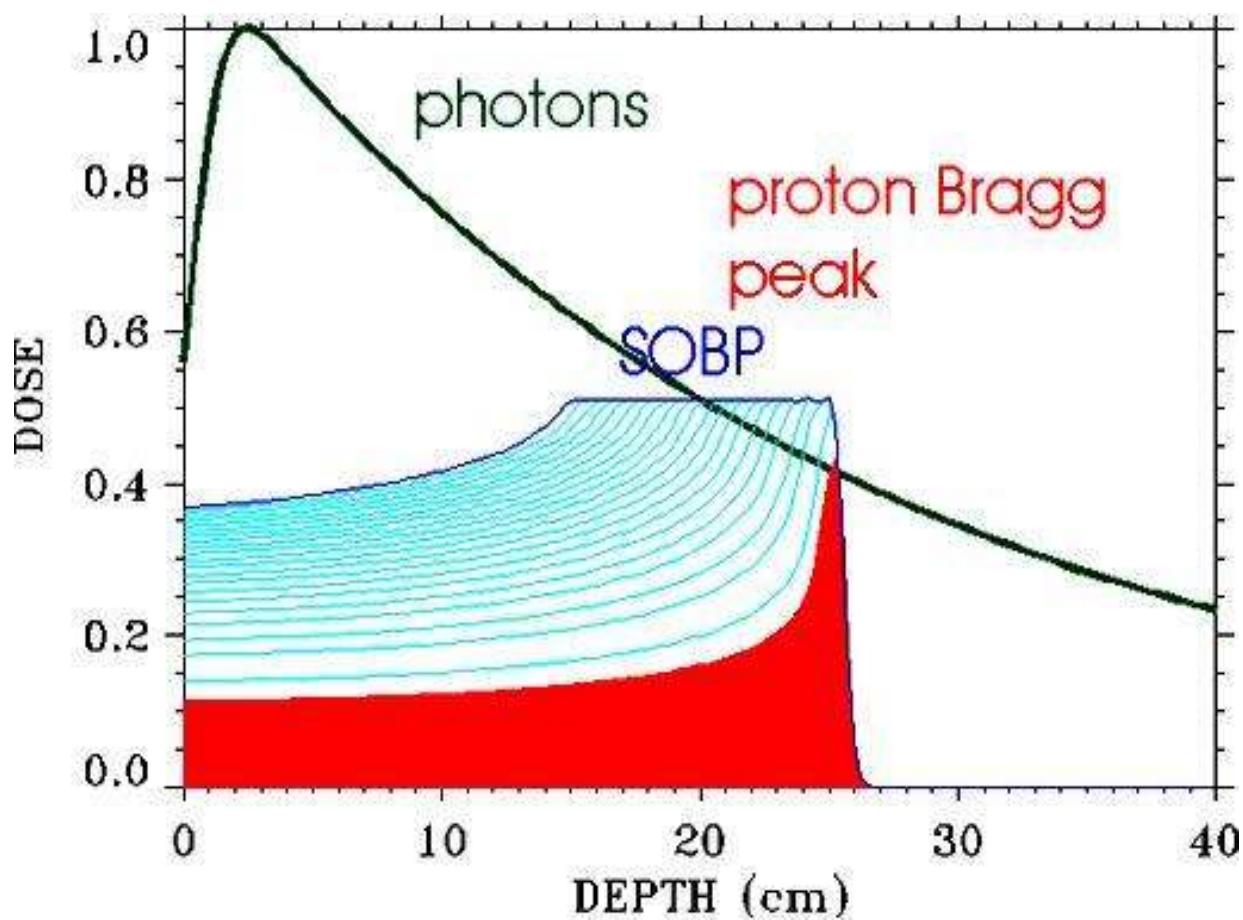
Graf znázorňující relativní ionizaci iontů  $^{12}\text{C}$  v centimetrech zkušebního média (voda).



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

### **Příloha 3**

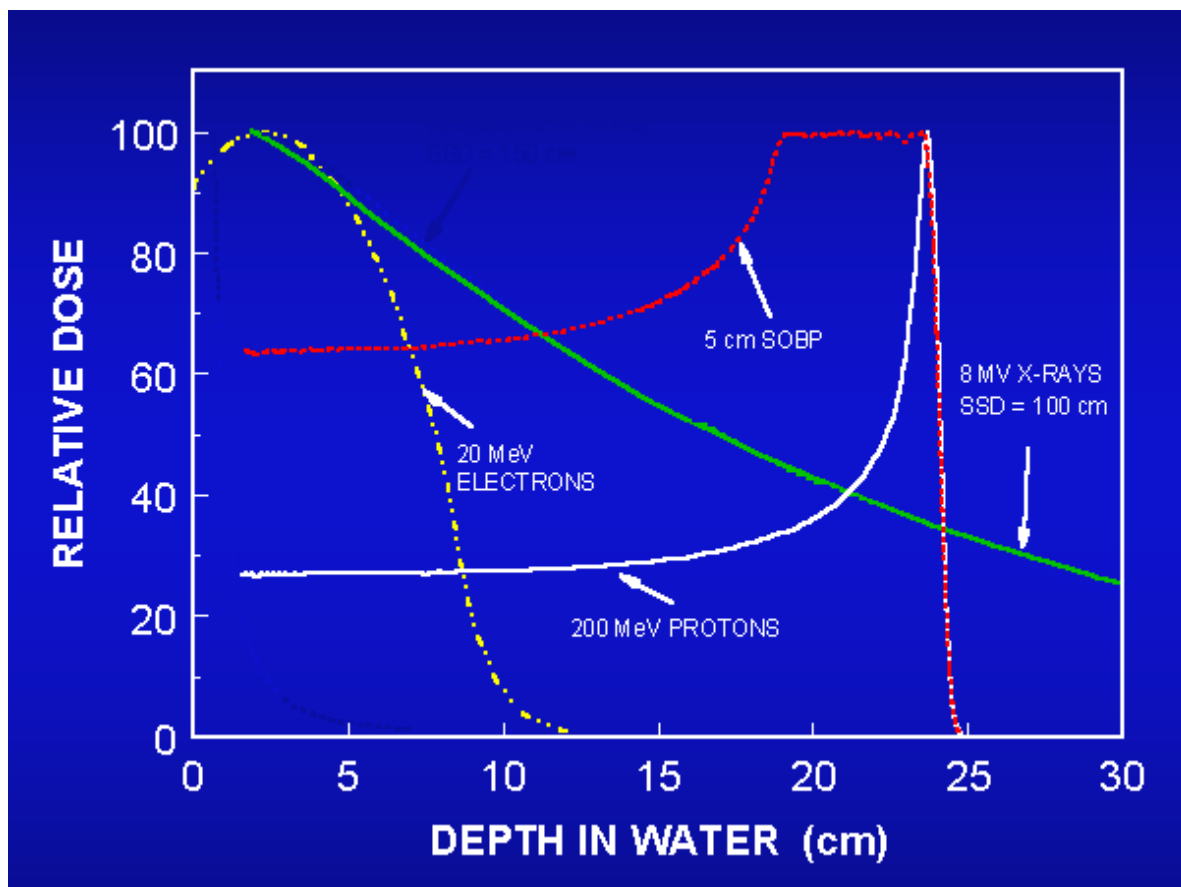
Graf znázorňující srovnání přenosu energie u fotonů a protonů v hloubce tkáně. Dále je zde znázorněn rozšířený Braggův pík (SOBP).



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 4**

Znázornění závislosti relativní dávky a předané energie v určité hloubce ve vodě u elektronů, záření X a protonů.

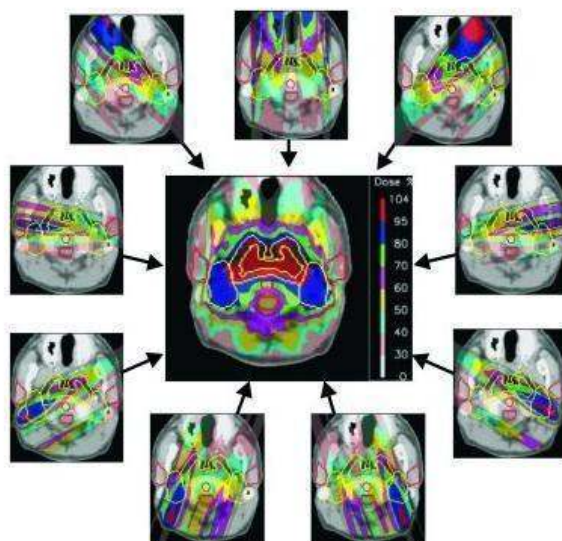


Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

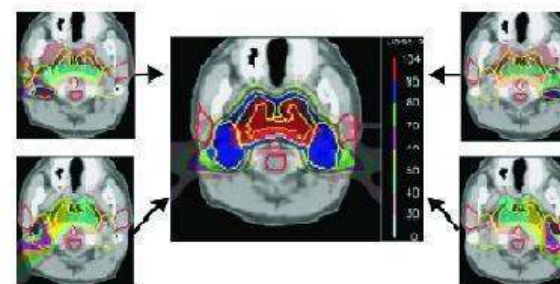
## **Příloha 5**

Srovnání distribuce dávek a ozáření zdravých tkání u terapie typu IMRT pomocí fotonů a u terapie typu aktivní skenování pomocí protonů.

### Fotony - IMRT



### Protony - aktivní skenování



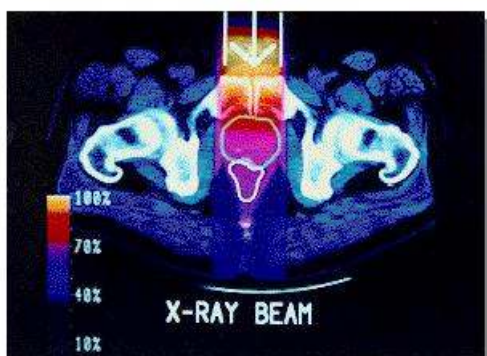
Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>



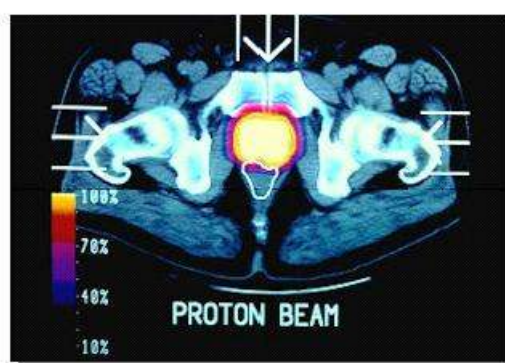
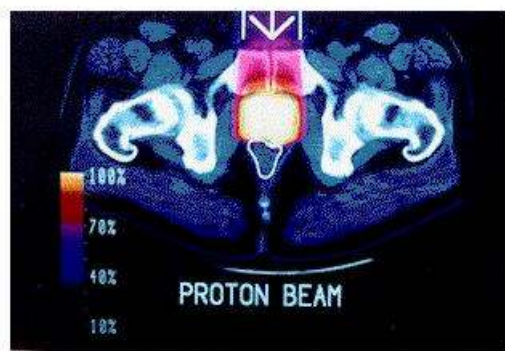
## **Příloha 6**

Srovnání distribuce dávky u ozařování pomocí fotonů a protonů.

## Fotony



## Protony



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 7**

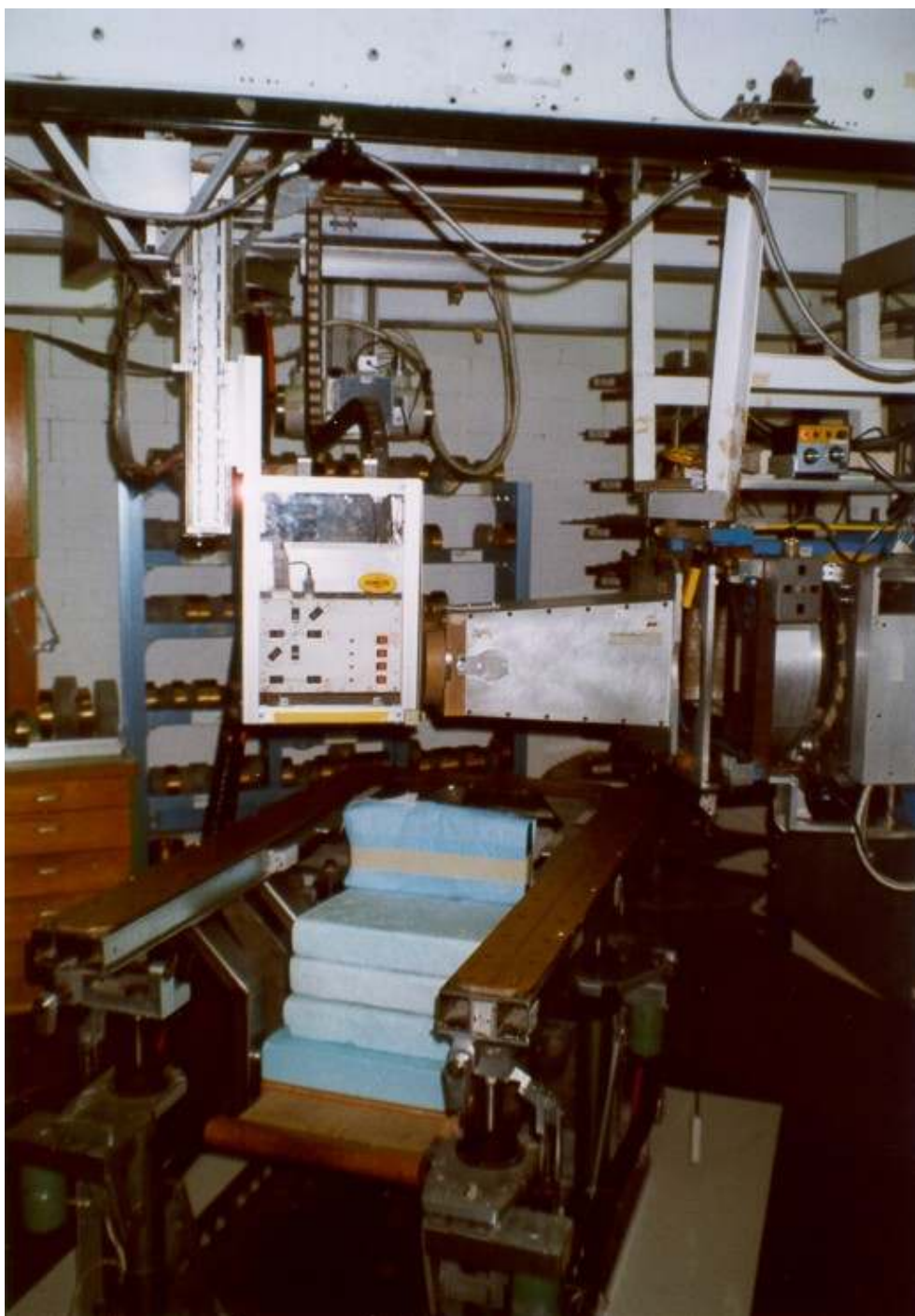
Transportní trasy svazku.



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 8**

Polohovací křeslo pro ozařování pomocí hadronové terapie (před dokončením).



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 9**

Výstupní okno svazku, místo pro vložení rozptylovacích disků a kolimátorů.



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>



## **Příloha 10**

Gantry systém pro ozařování z libovolného směru



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 11**

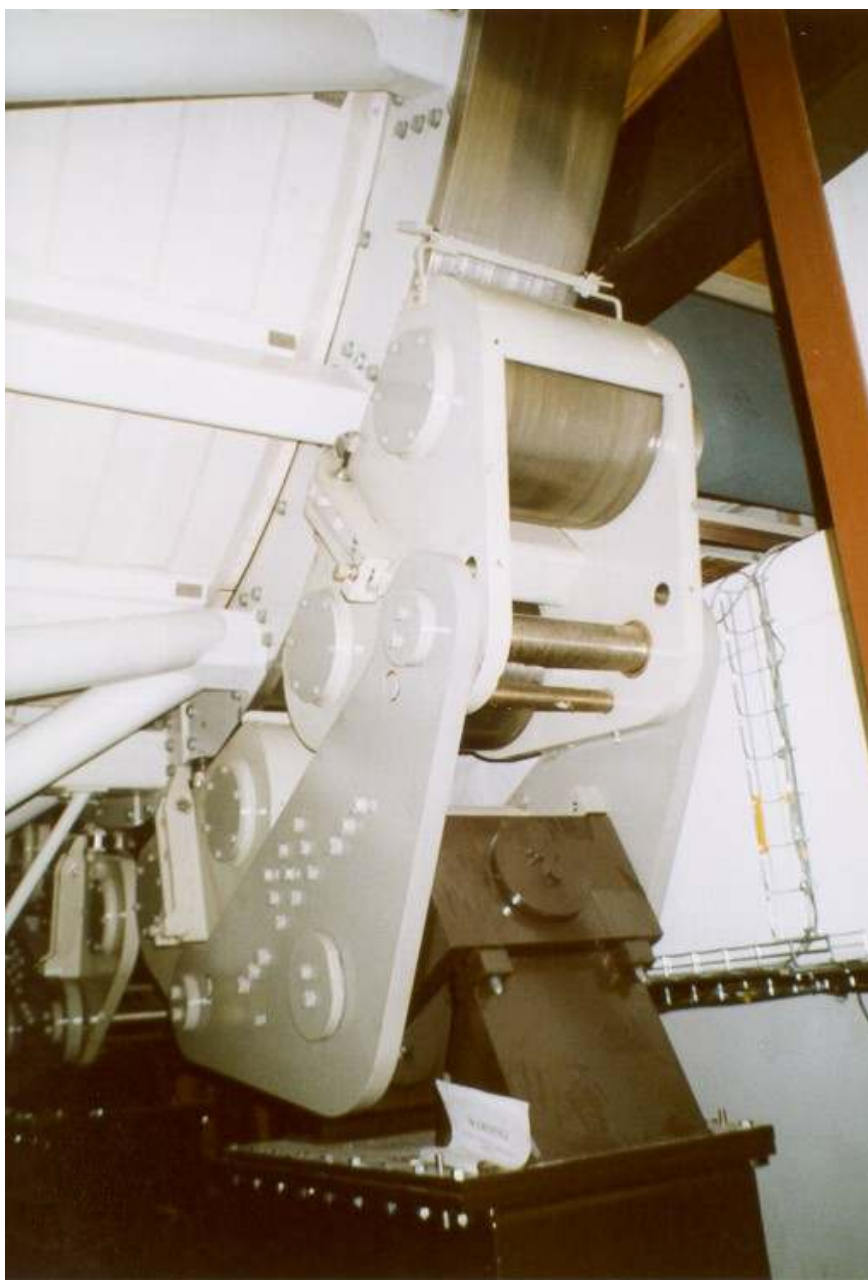
Gantry systém pro ozařování z libovolného směru – detail výstupní hlavice.



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 12**

Gantry systém pro ozařování z libovolného směru – servomotory umístěny vně.



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 13**

Ovladovna (řídící místnost).

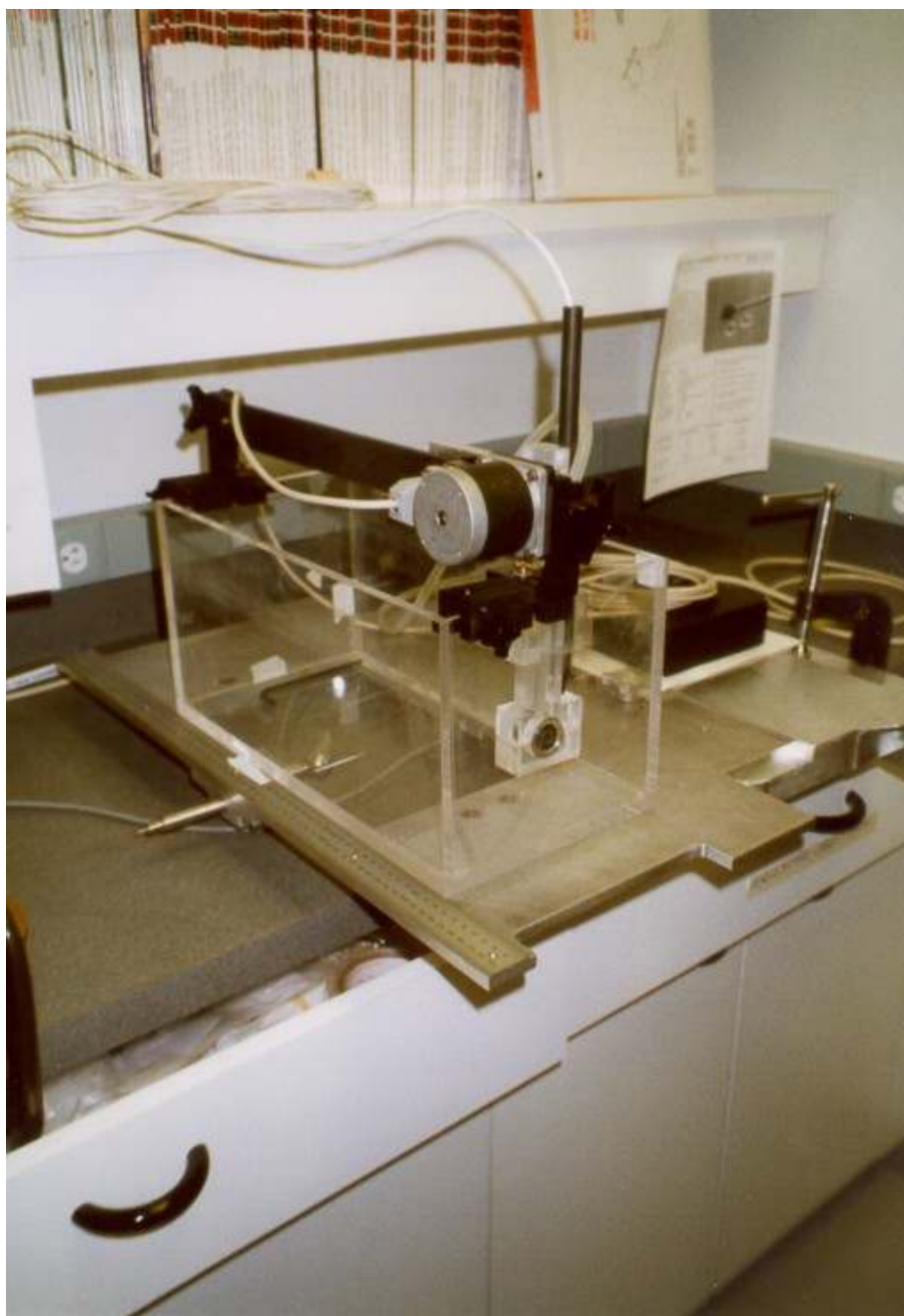


Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>



## **Příloha 14**

Aparatura pro dozimetrii svazku



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 15**

Rotační klínovité disky pro pasivní rozptyl svazku.



Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 16**

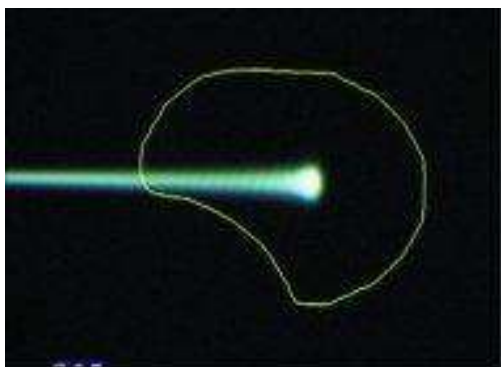
Kolimátor pro vymezení průřezu svazků podle nepravidelného tvaru nádoru individuálně vyrobený pro pacienta. Kompenzátor k přizpůsobení oblasti ozáření podle zadní stěny nádoru.



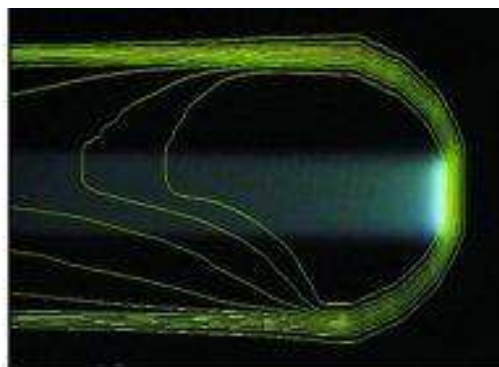
Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>

## **Příloha 17**

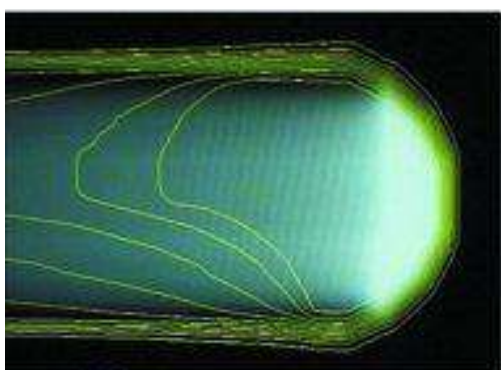
Metoda aktivního skenování.



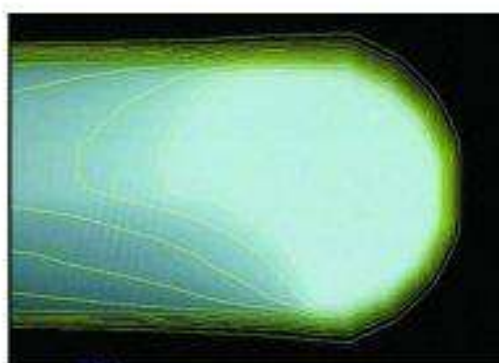
**Jednotlivý svazek**



**Boční skening**



**Skening v hloubce**



**Výsledná trojrozměrně  
přizpůsobená dávka**

Zdroj: <http://www.particle.cz/medicine>