

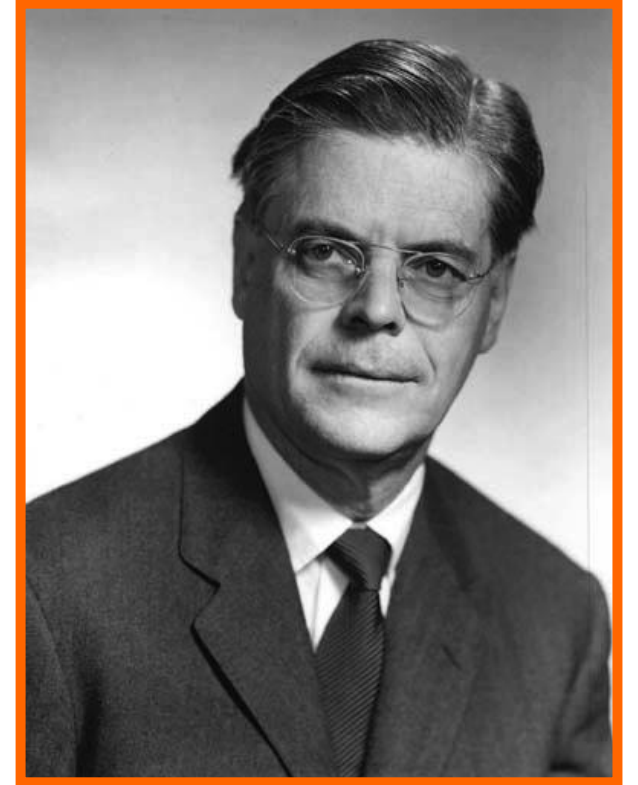


Osnove protonske in ionske radioterapije

Urban Simončič

Zgodovina radioterapije s protoni in ioni

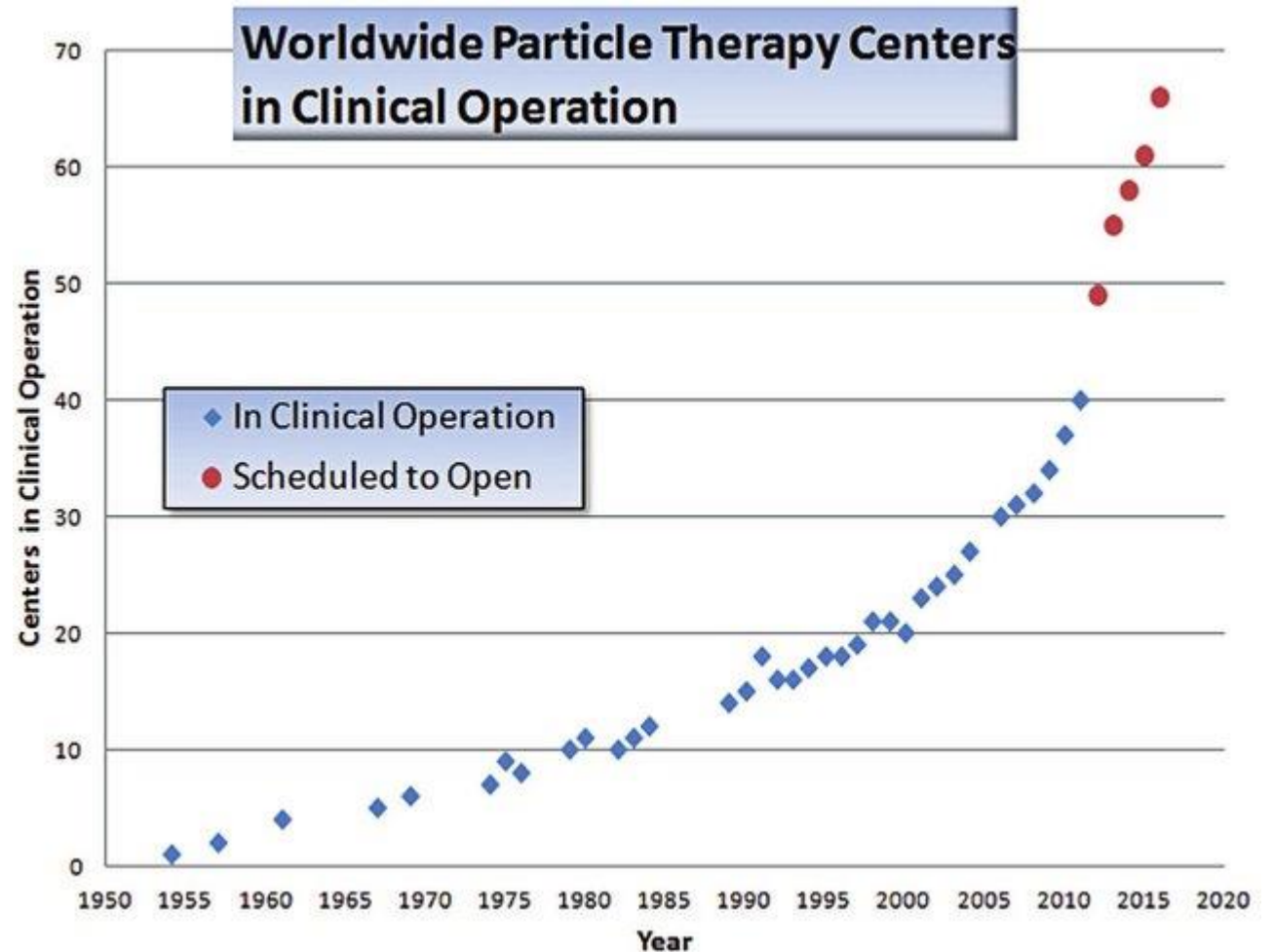
- 1918 Ernest Rutherford odkrije proton
- 1946 Temeljni dokument Roberta R. Wilsona
 - Ideja o izkoriščanju Braggovega vrha za radioterapijo
- 1956 Prvo zdravljenje v Berkeleyju, Kalifornija
- 1957 Prvo zdravljenje v Uppsali na Švedskem
- 1961 Prvo zdravljenje na Harvardu, MA
- 1990 Prva ustanova za klinično zdravljenje v Loma Linda, Kalifornija



Robert Wilson (1914-2000)

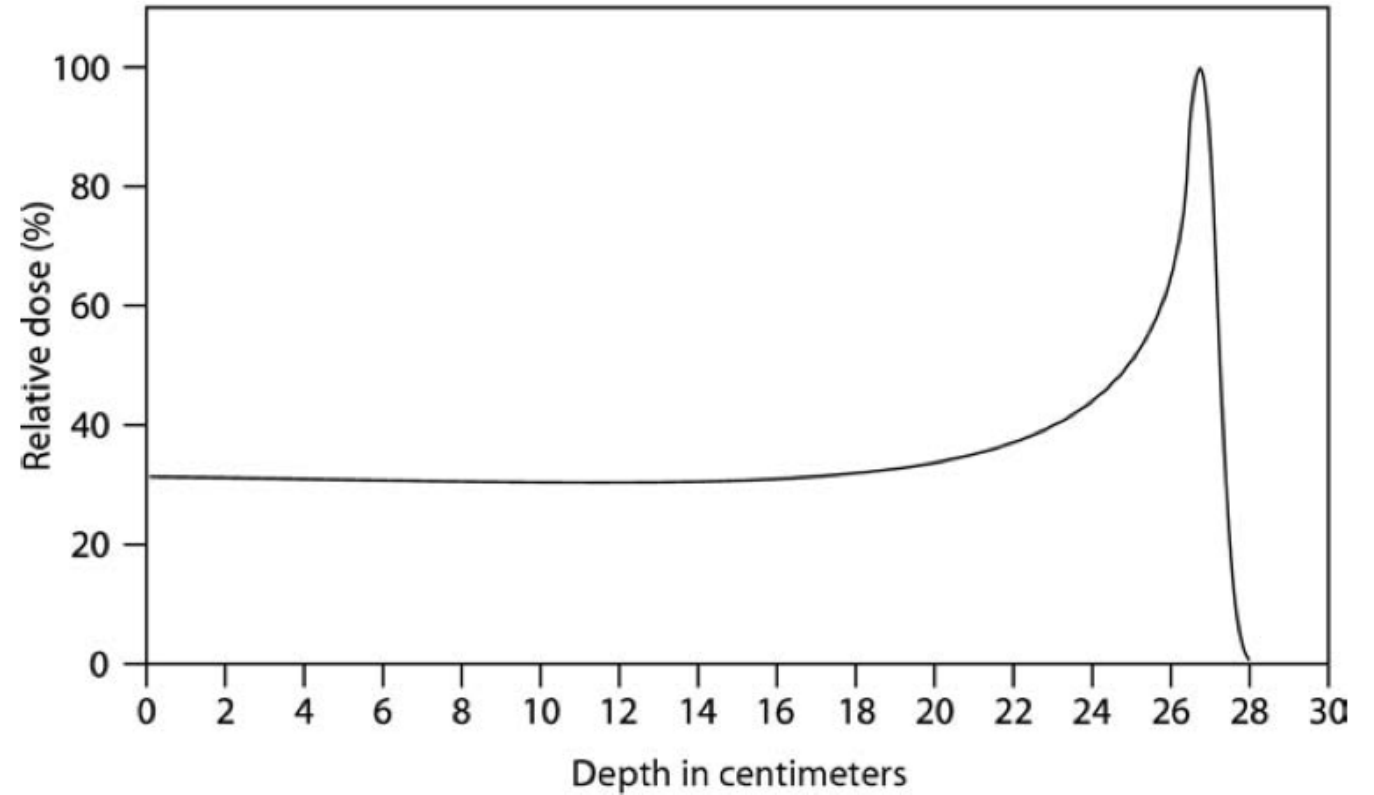
Število centrov za radioterapijo z ioni

- Nekje do 90' let se zdi naraščanje linearno
- Potem se povečuje letno število novih centrov
- Okrog leta 2010 je velik prelom v številu centrov
- V zadnjem času se morda nekoliko ustavlja rast



Kako nastane Braggov vrh

- Izguba energije delcev
 - Trki z elektroni
- Zmanjšanje intenzitete curka
 - Jedrske interakcije



Energijske izgube: zavorna moč

- Bethe-Blochova enačba

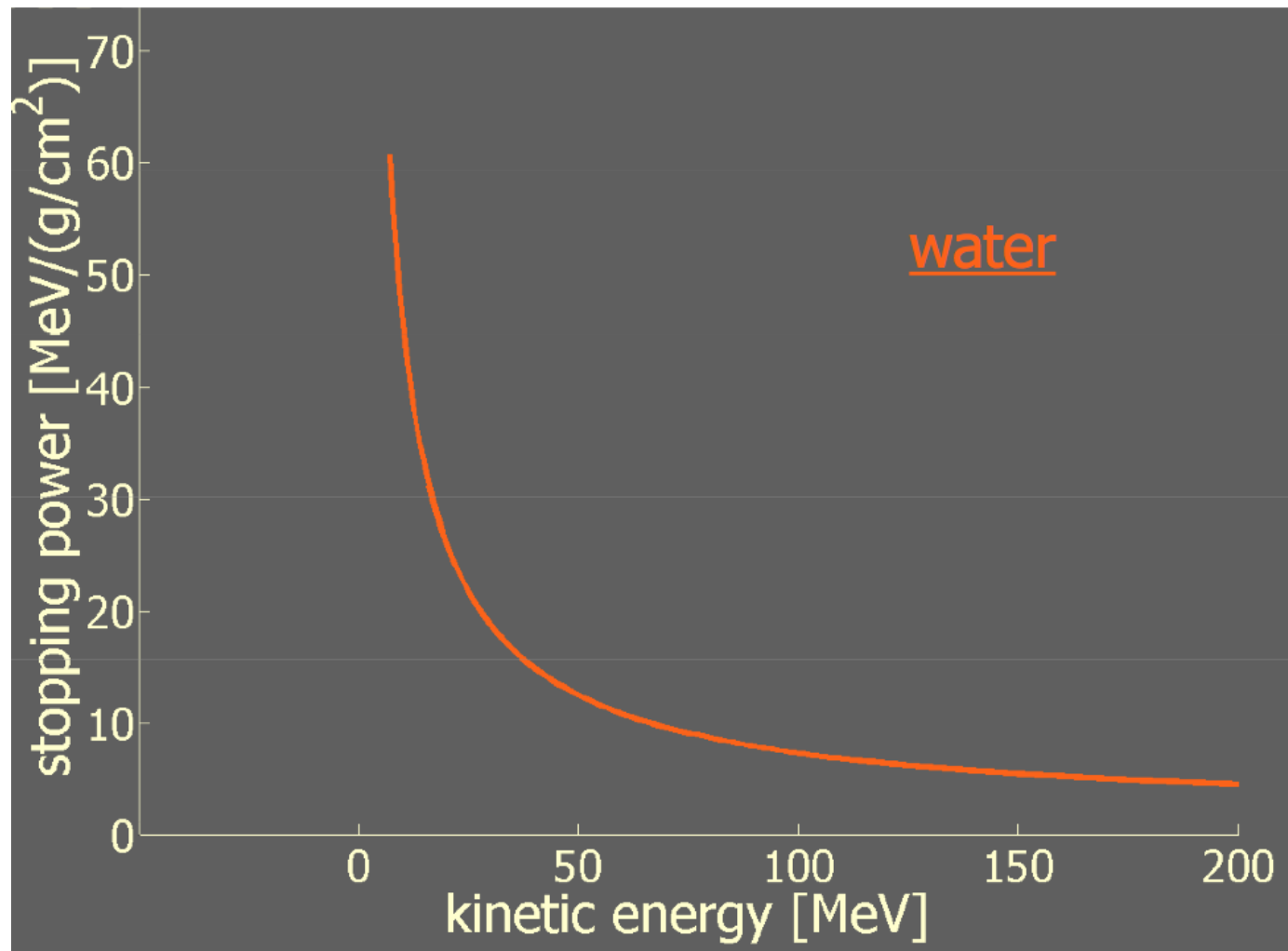
Naboj projektila

$$S(z) = Cm \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \beta^2 T_{\max}}{I^2 (1 - \beta^2)} \right) - 2\beta^2 - U \right]$$

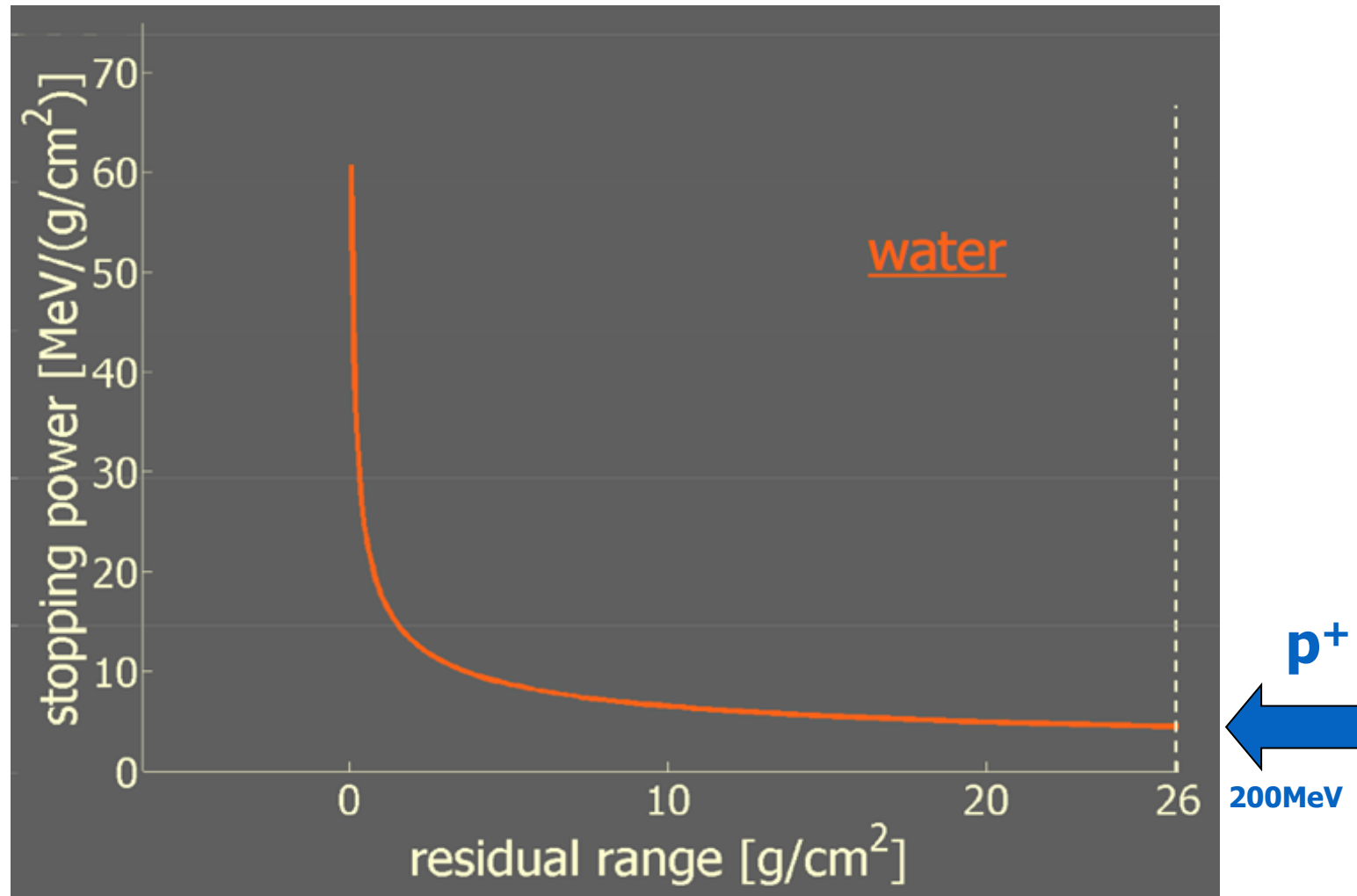
ionizacijski potencial

$$\beta^2 = \frac{v^2}{c^2} \propto E$$

Energijske izgube: zavorna moč



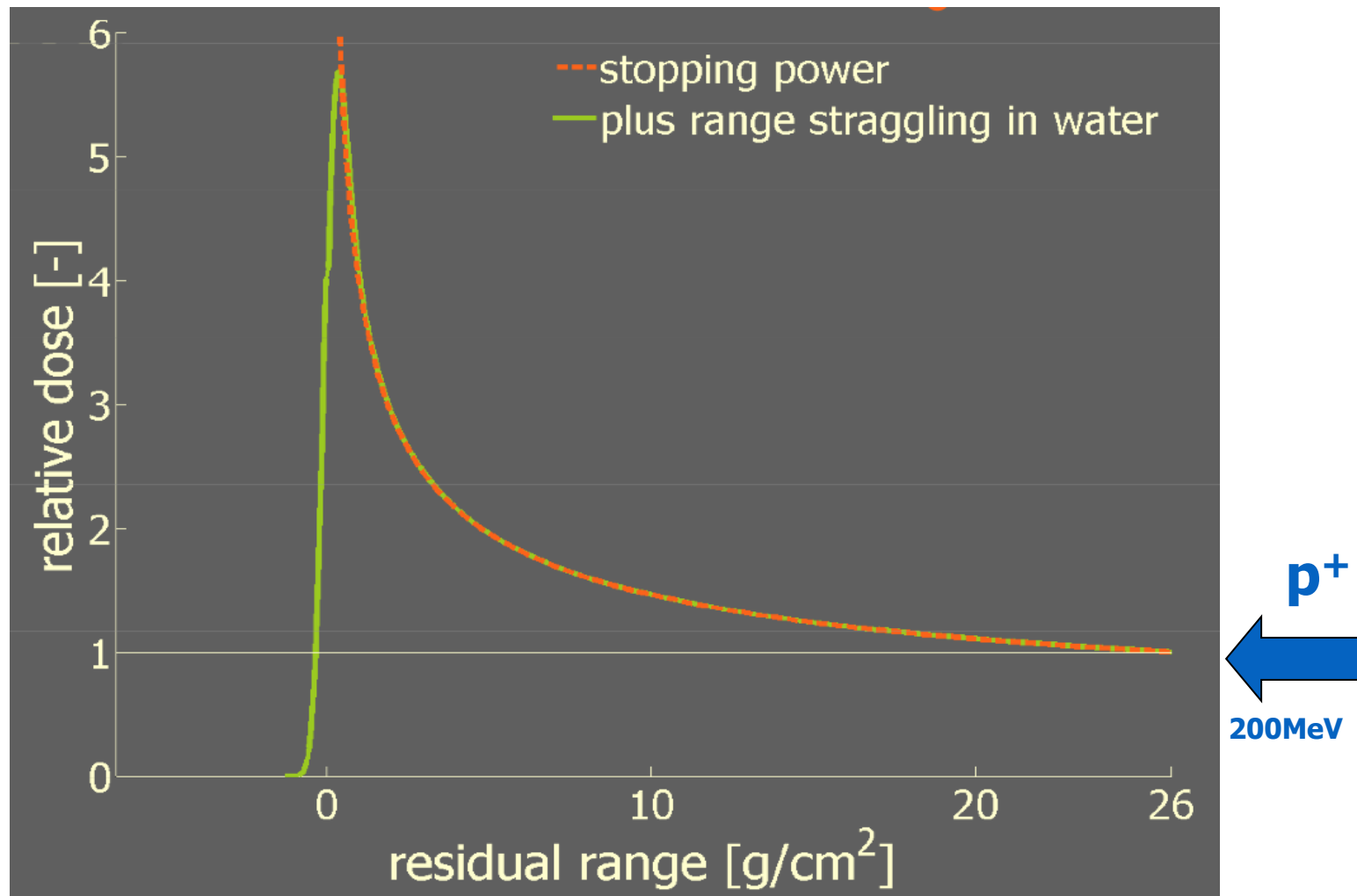
Energijske izgube: zavorna moč



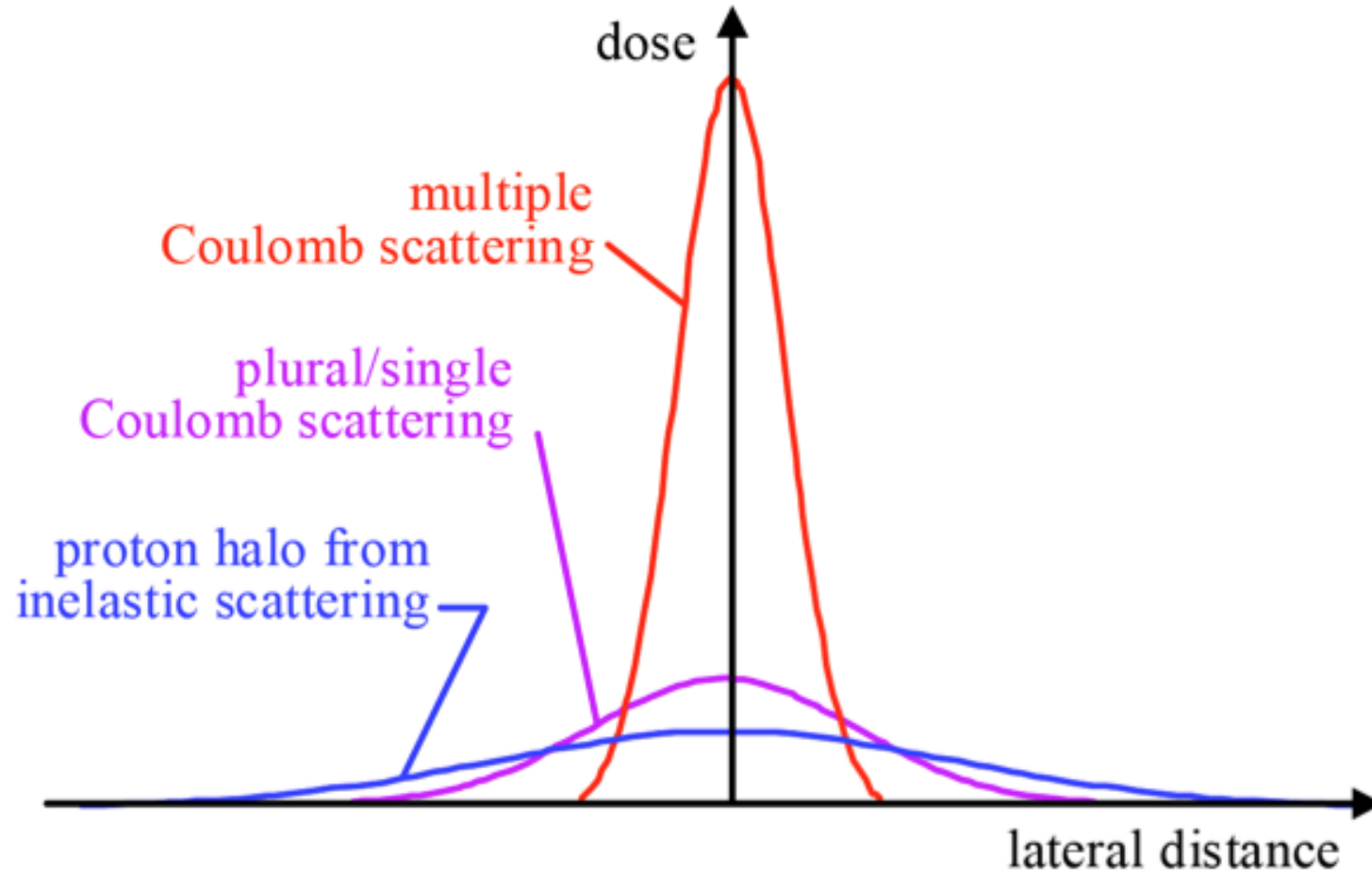
Raztros v dosegu

- Doslej je bila izguba energije delca opisana z aproksimacijo zveznega upočasnjevanja
- Protoni dejansko ne izgubljajo energije zvezno, temveč z individualnimi interakcijami z elektroni, za katere imamo poznane verjetnostne porazdelitve
- Protoni z enako začetno energijo imajo nekoliko različne dosege
 - Stohastična narava interakcij z elektroni
- Raztros v dosegu je Gaussov ($\sigma \approx 1\% R_{\text{CSDA}}$)

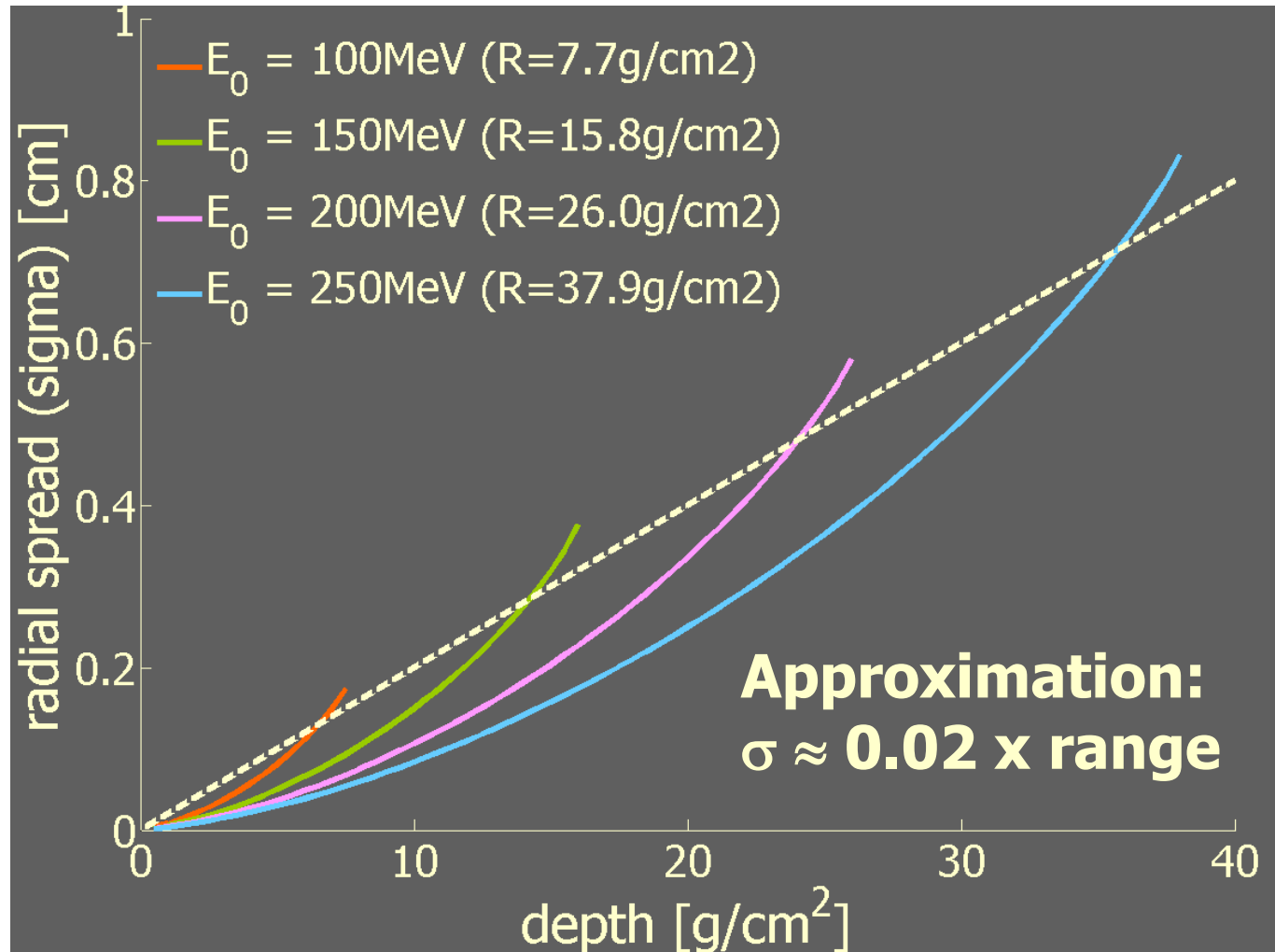
Braggov vrh



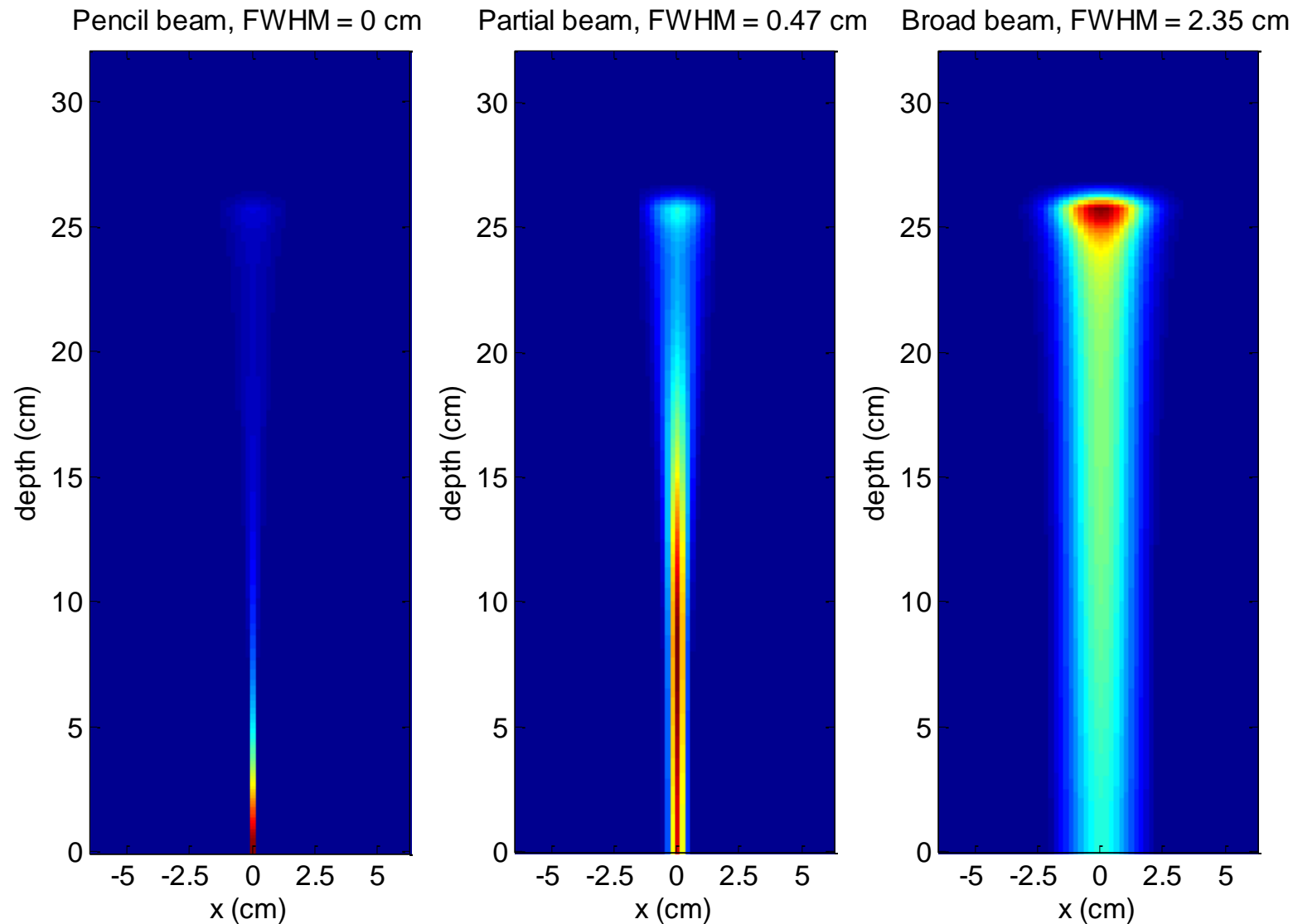
Radialno širjenje ionskega curka



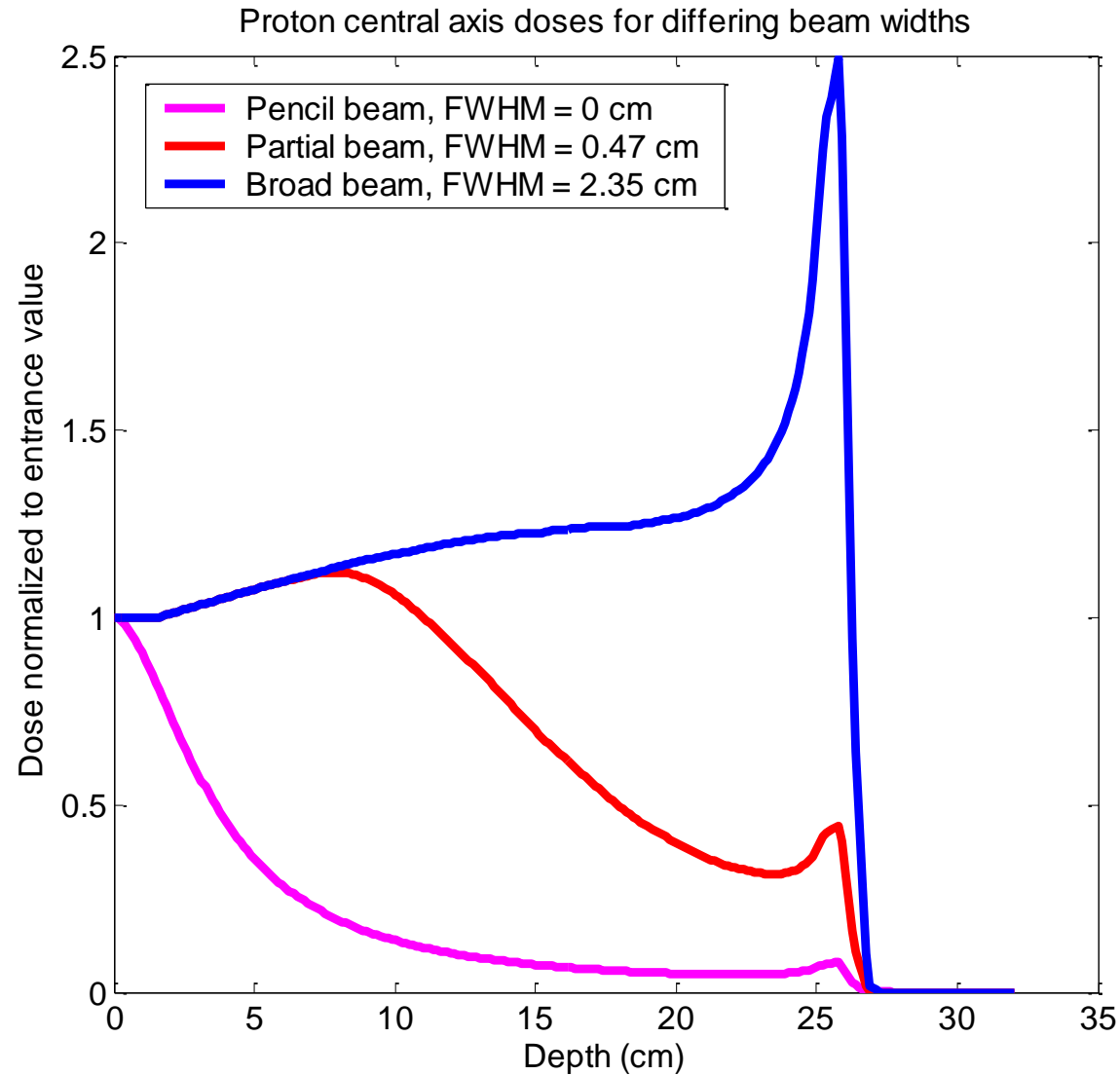
Radialno širjenje ionskega curka



Velikost protonskega curka



Velikost protonskega curka in Braggov vrh

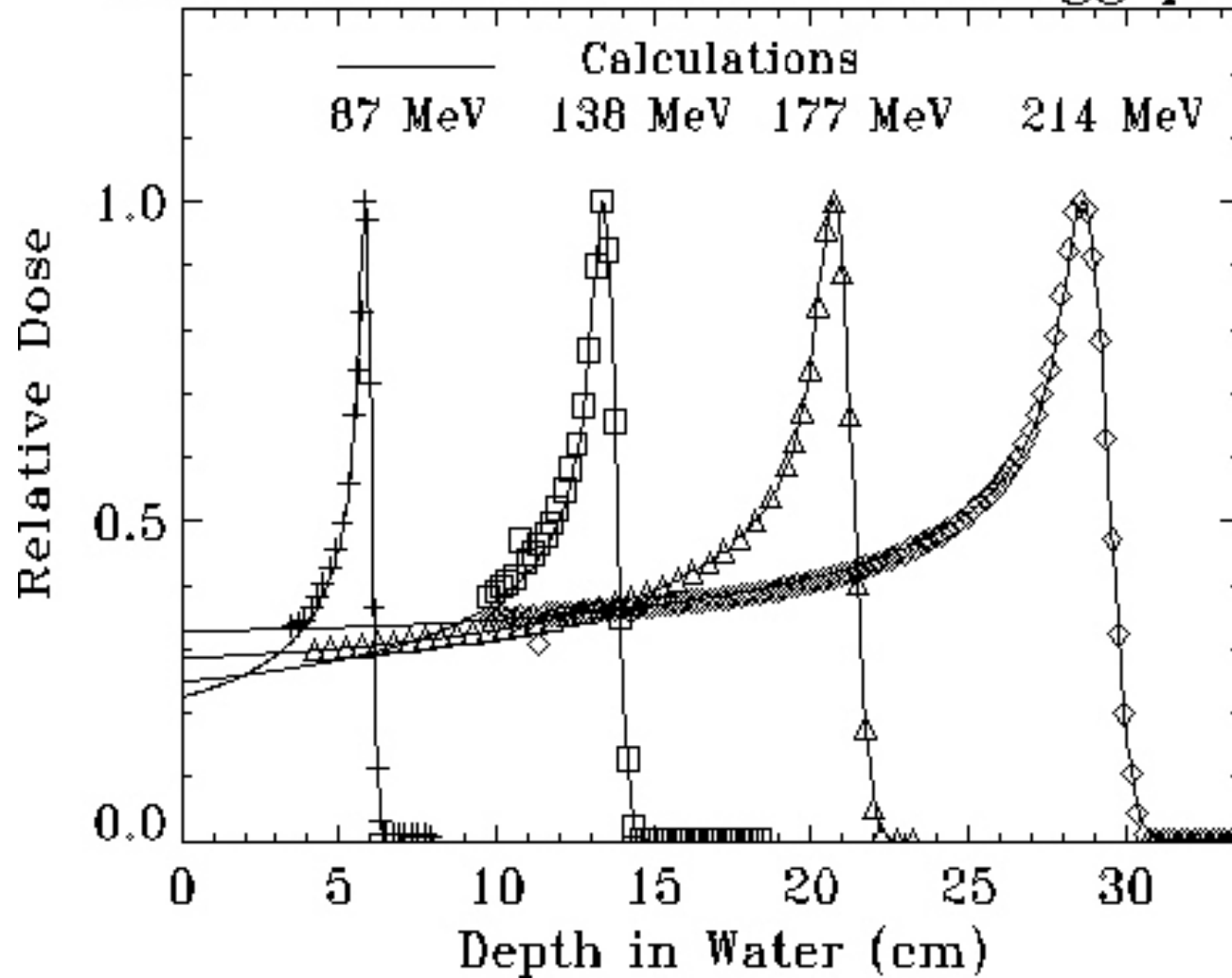


Jedrske interakcije

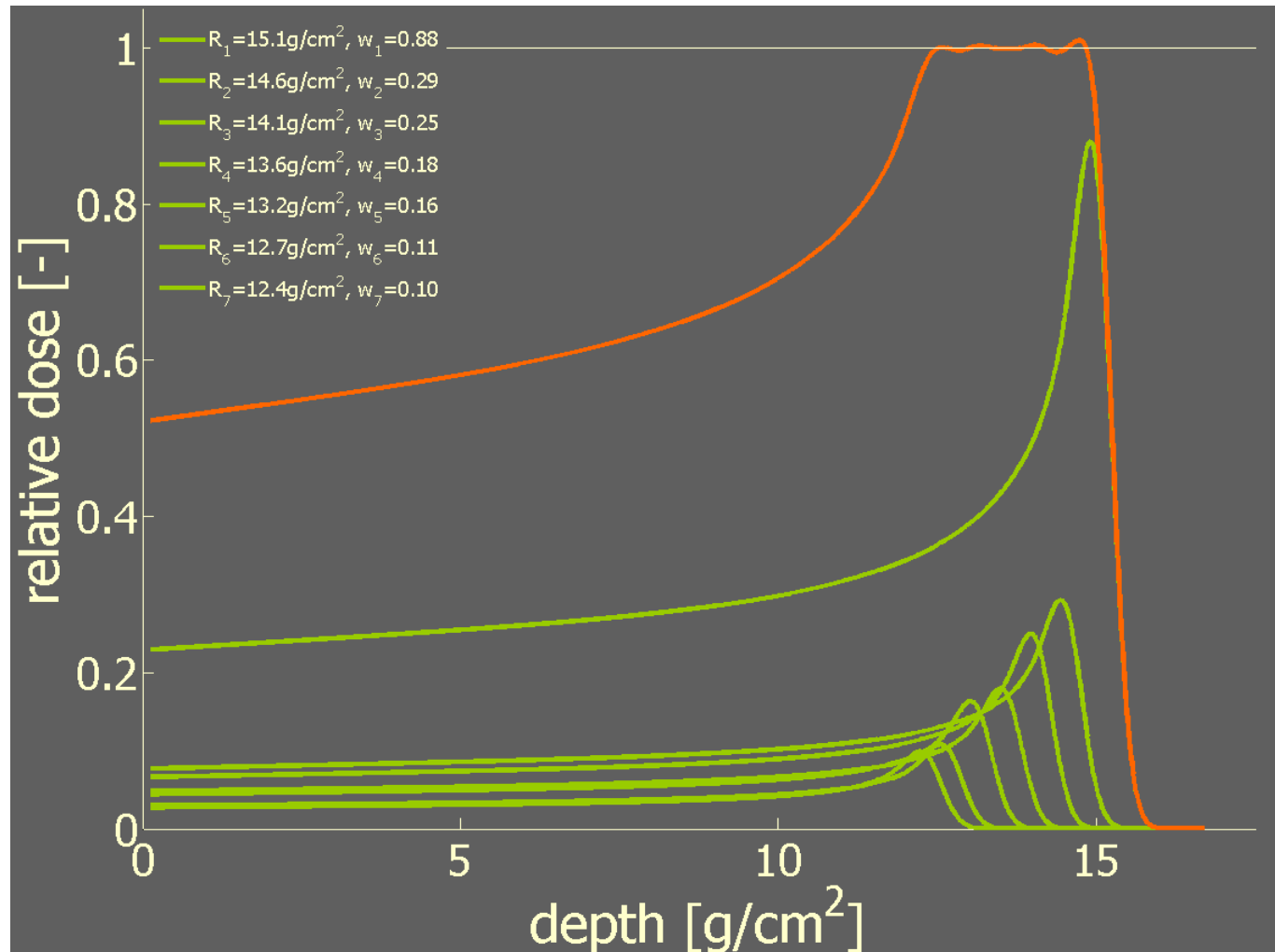
- Približno 20 % vpadnih protonov doleti jedrska interakcija – večinoma z ^{16}O
- Posledica je zmanjšanje dotoka protonov z globino
- Poleg tega nastanejo sekundarni delci:
 - Nabiti delci (p, d, α , izbita atomska jedra) ~60 % energije → absorbirajo se "lokalno"
 - Nevtralni delci (n, γ) ~40 % energije → absorbirajo se v 'okolici'
- Nastajanje nestabilnih delcev ob jedrskih interakcijah (aktivacija)
 - Varnost pred sevanjem
 - Preverjanje doze s PET/CT

Energijska odvisnost Braggovega vrha

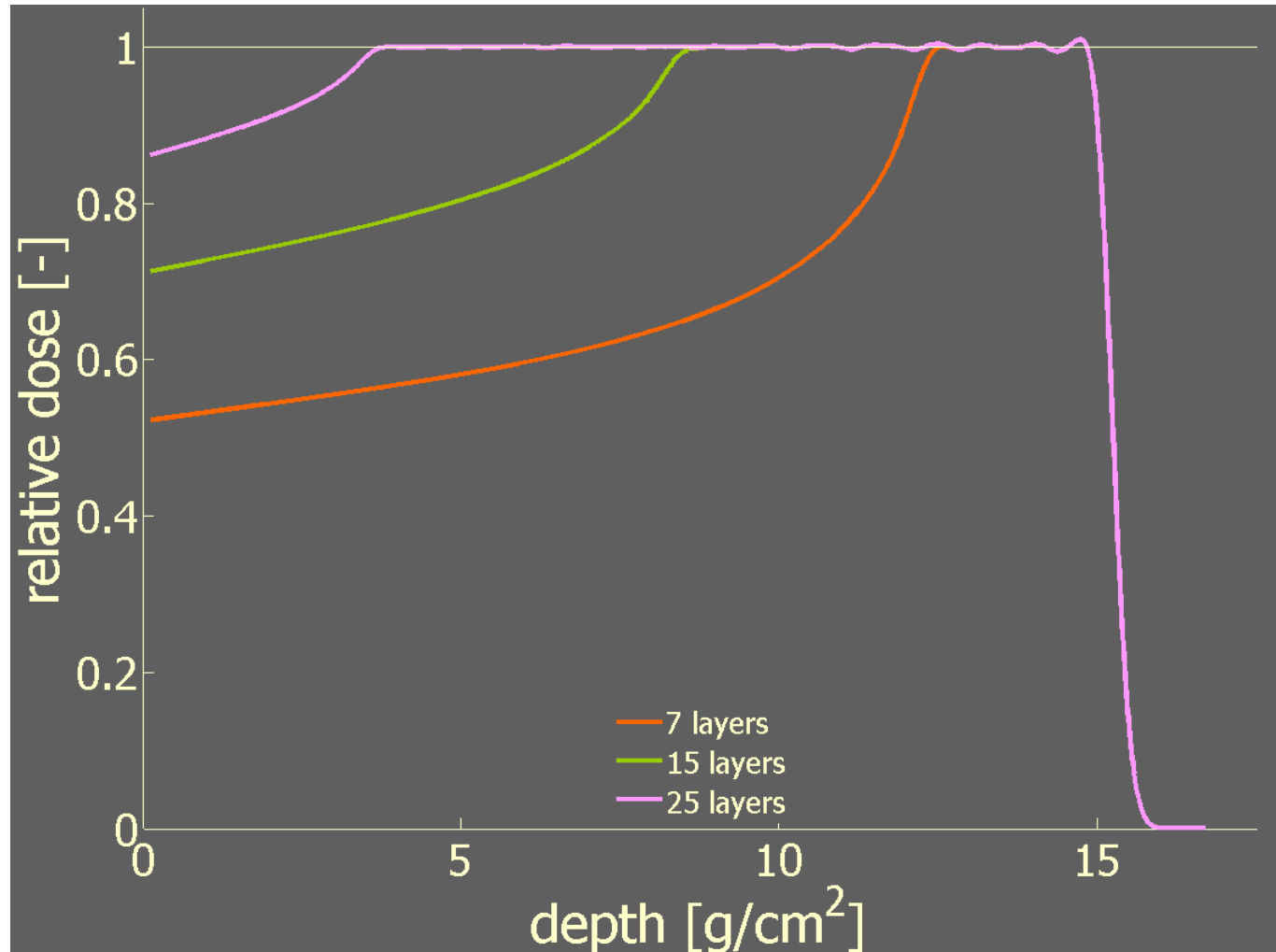
Measured and calculated Bragg peaks



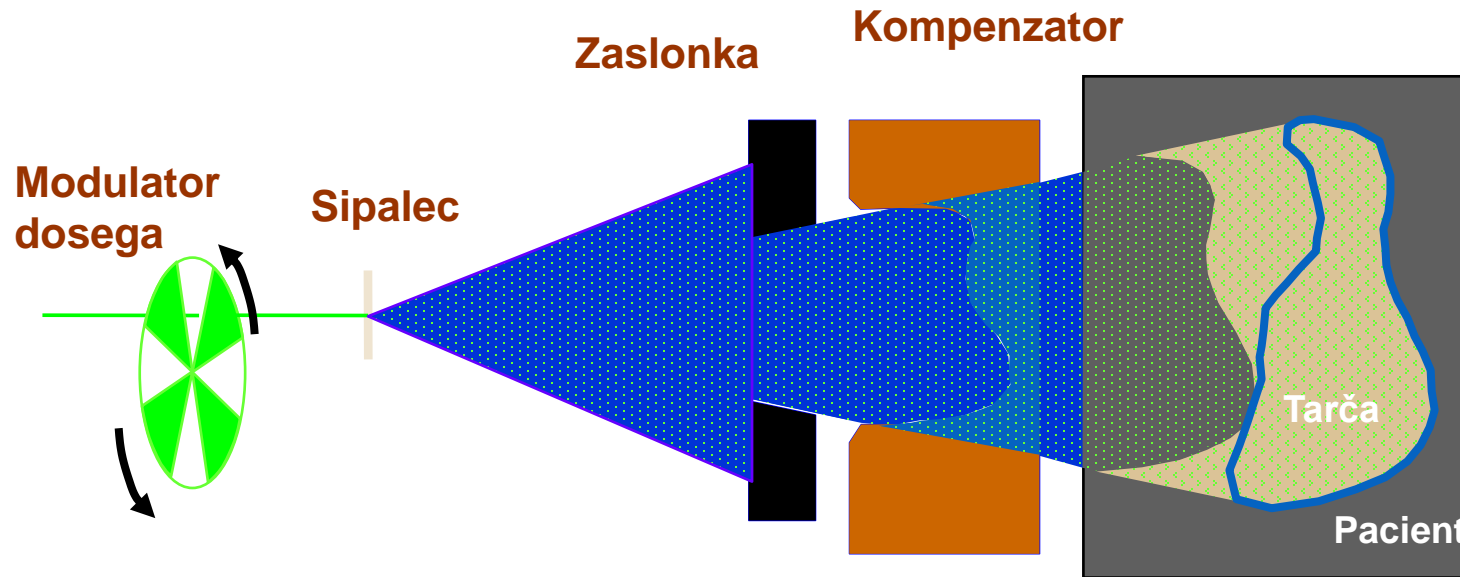
Razširjen Braggov vrh



Razširjen Braggov vrh – različno število plasti



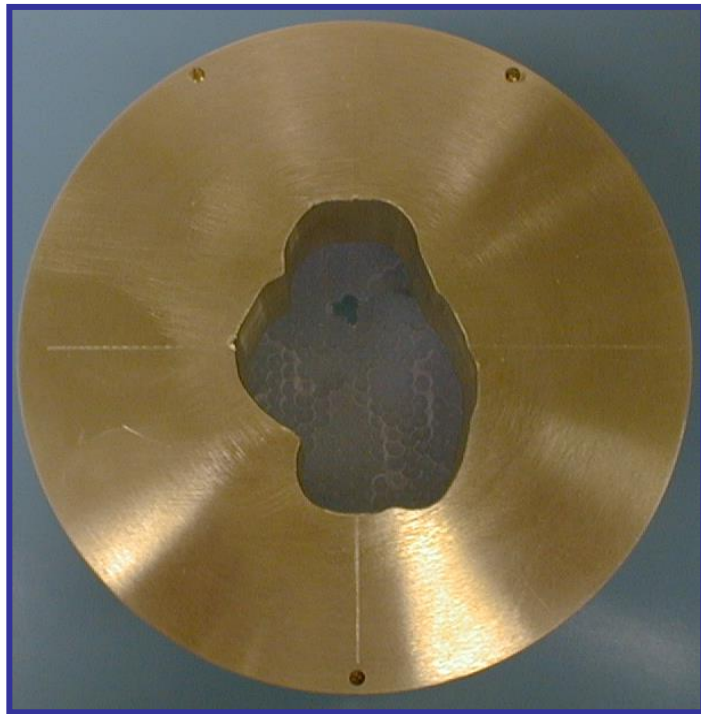
Pasivno razširjanje protonskega curka



- Kompenzator dosega omeji doseg na najbolj oddaljen del tumorja
- Zaslanka oblikuje polje v prečni smeri
- Modulator dosega modulira doseg protonov – razširi Braggov vrh
- Sipalec razširi protonski curek v prečni smeri

Zaslonke – specifične za obsevalno polje

Medeninasta zaslonka
(rezkana)

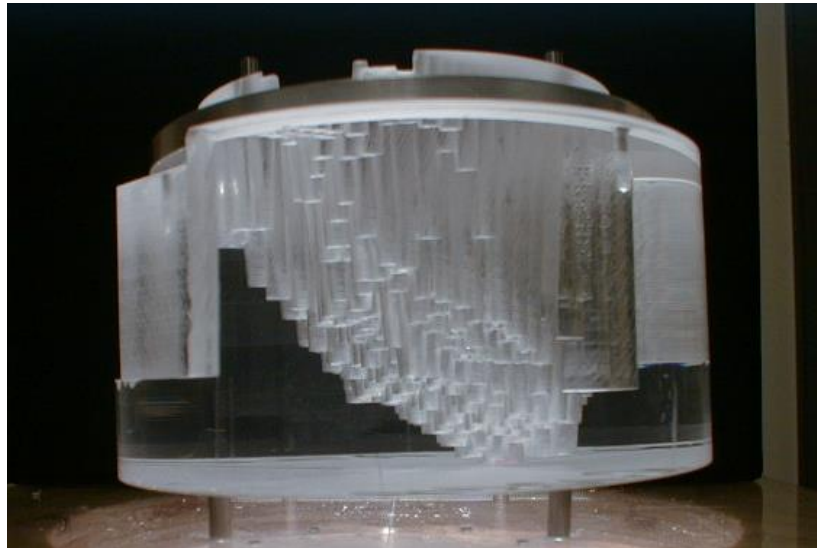


Zaslonka iz zlitine
(odlitek)

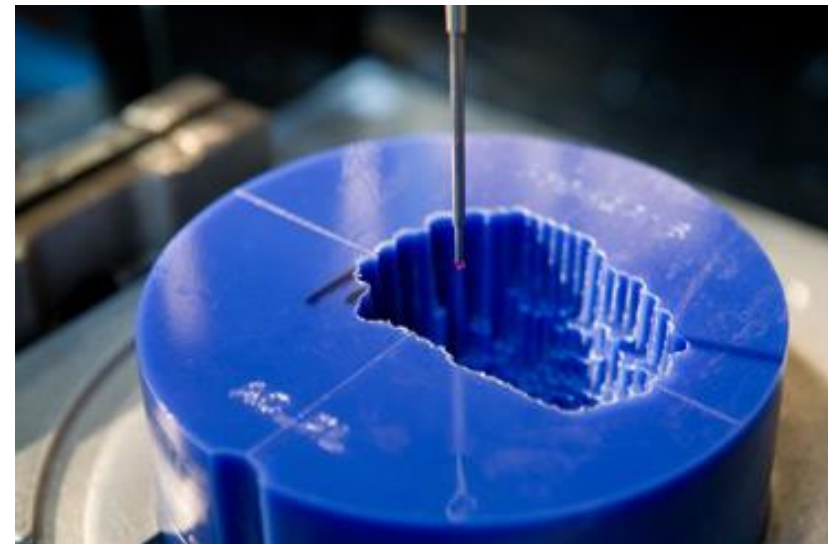


Kompenzatorji – specifični za polje

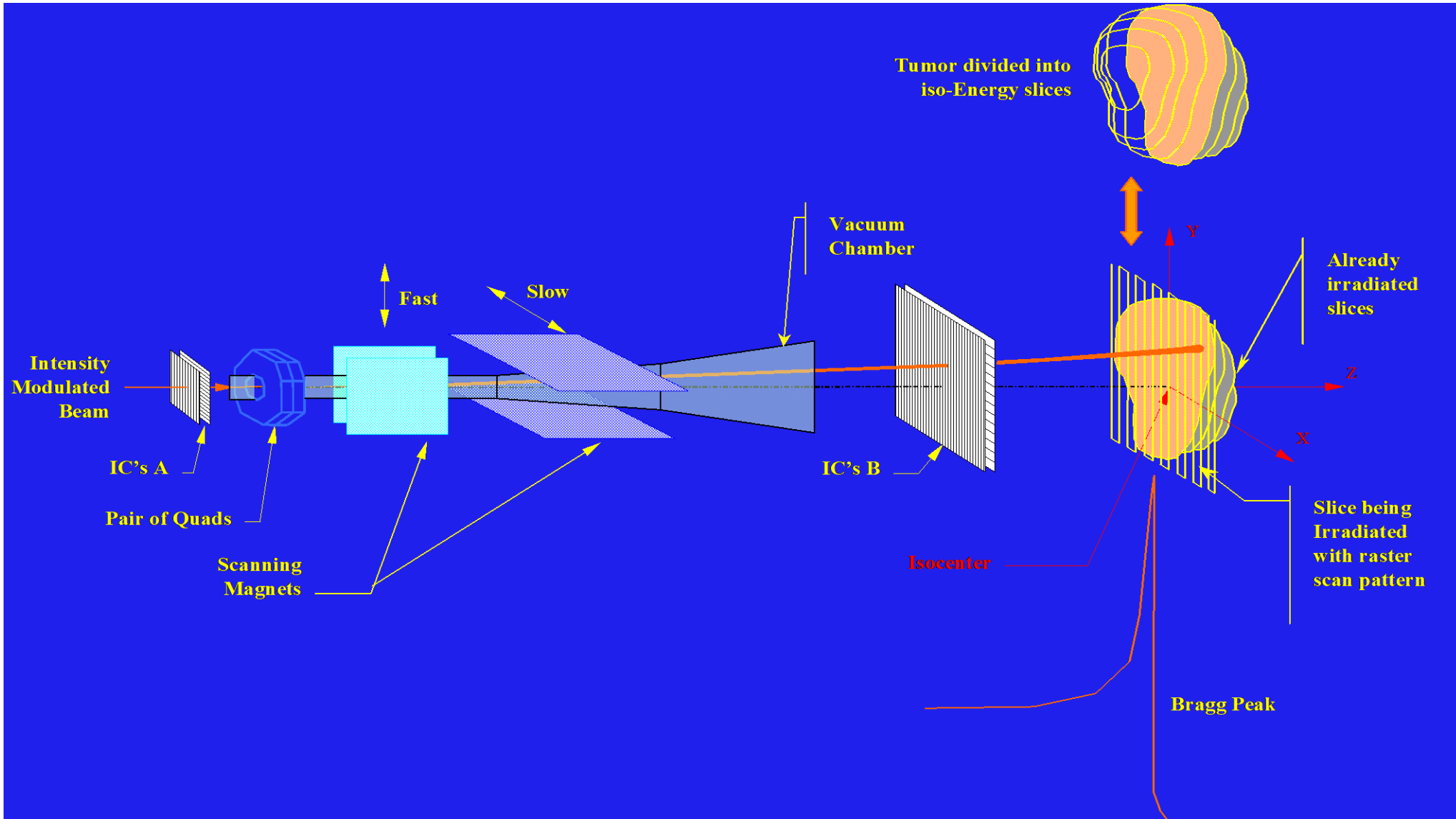
Kompenzator dosega – akril



Kompenzator dosega – vosek

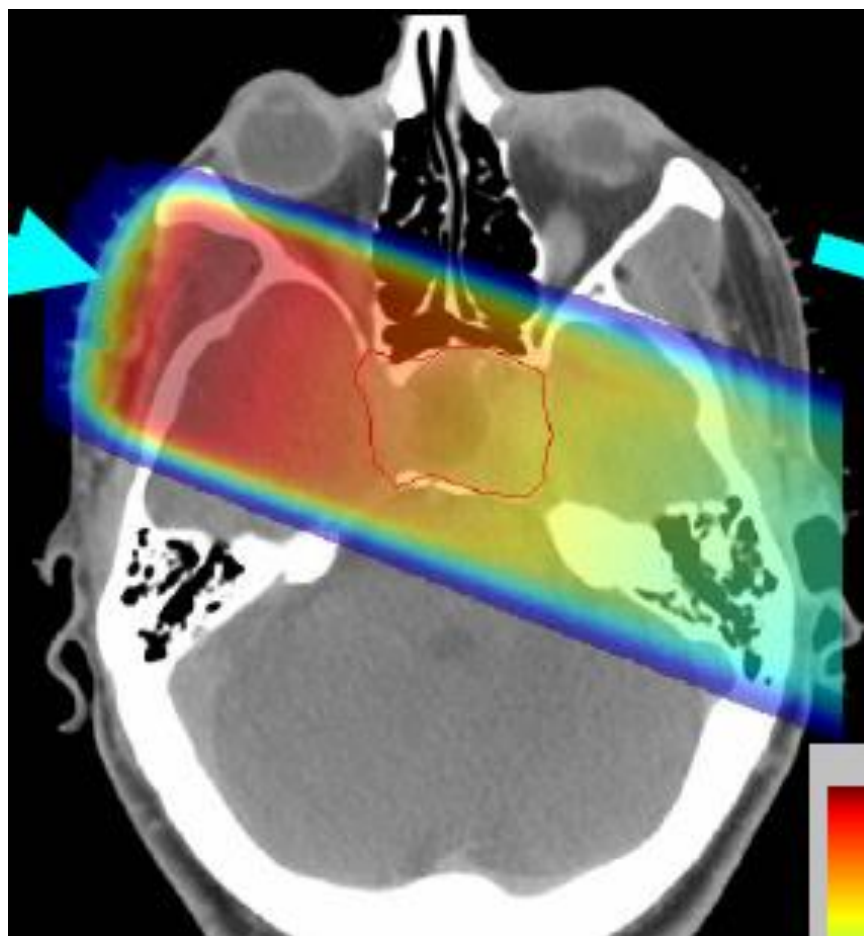


Aktivno razširjanje protonskega curka

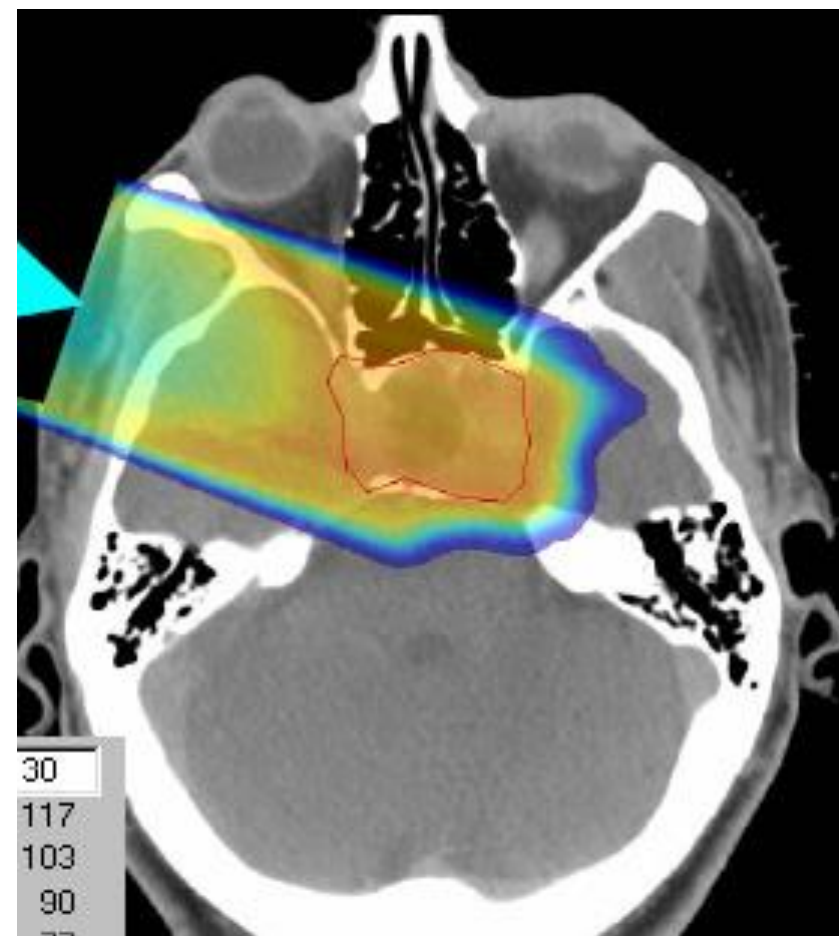


Primerjava doze – protoni in fotoni

Fotonska radioterapija

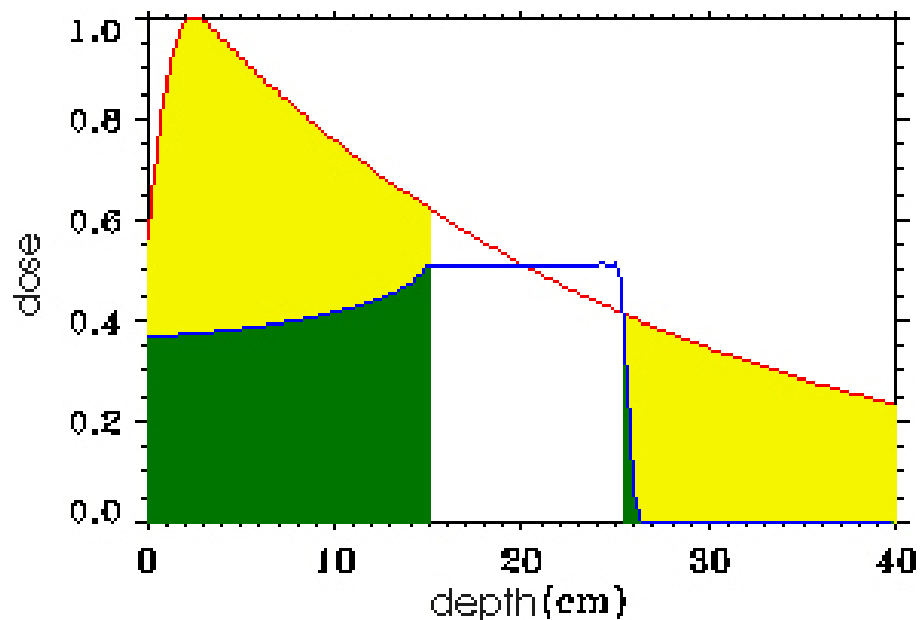


Protionska radioterapija

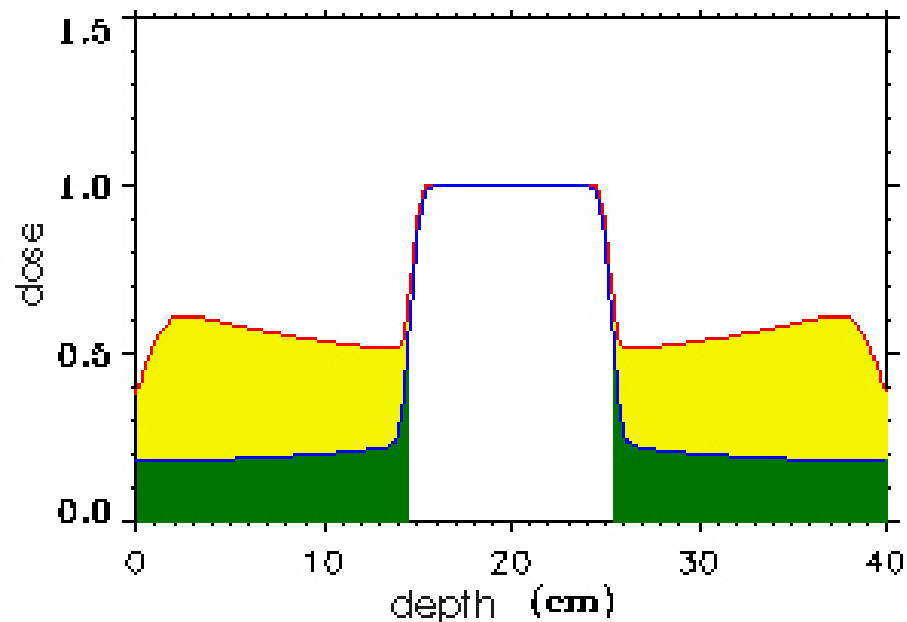


30
117
103
90
77

Glavna prednost – zmanjšana integralna doza



1 field



4 fields

protons

photons

Glavna prednost – zmanjšana integralna doza

