

Le soluzioni tomoterapiche - Aspetti fisici -

Michele Stasi



S.C. Fisica Sanitaria - A.O. Ordine Mauriziano di Torino
IRCC di Candiolo (TO)



Convegno AIRO Piemonte e Valle d'Aosta – ASTI, 18 Ottobre 2008

Cosa e' la Tomoterapia ?

Trattamento IMRT dinamica ad arco
altamente conformazionale

“slice-by-slice”

per target piccoli e grandi, con maggior
rispetto e risparmio di organi critici



Definizione dell' Istituto Superiore di Sanità

- La Tomoterapia è la metodica che permette trattamenti IMRT in modalità seriale oppure elicoidale



Tomoterapia: i numeri

- Unità Tomoterapia Seriale (*NomoSTAT*) nel mondo:
~200
2 in Italia (Lecce, Avellino)
- Unità Tomoterapia Elicoidale (*Tomotherapy Hi Art*) nel mondo: ~ 250
7 Italia (Milano, Aviano, Meldola (FC), Reggio Emilia, Modena, San Camillo Roma,)



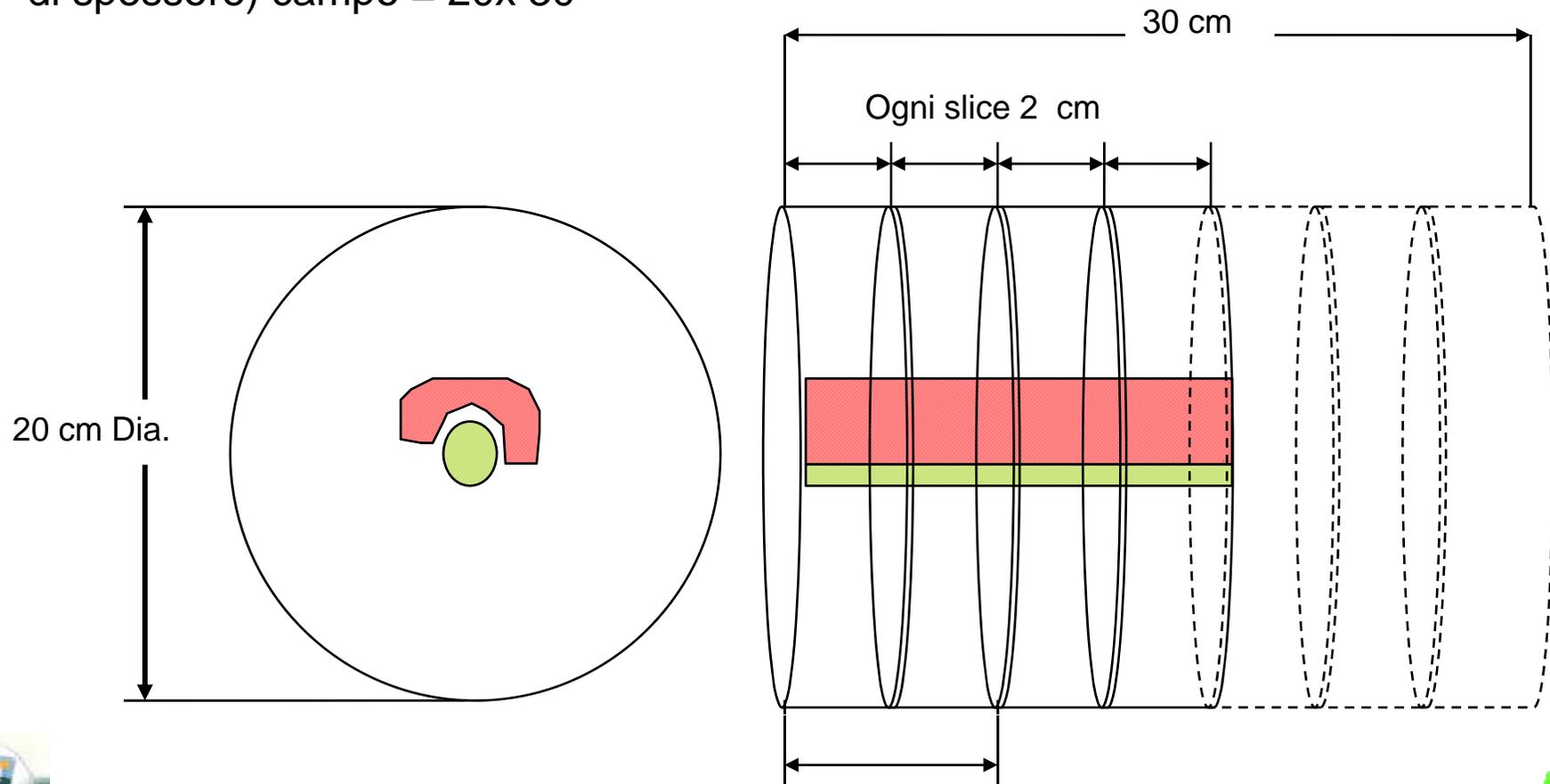
Cosa e' la Tomoterapia Seriale ?

- tomo = slice; tomotherapy = slice therapy;
- serial = sequenza di slices che definisce un volume
- Forma di IMRT avanzata
- Radiazione rilasciata attraverso MLC binario collegato alla testata del linac



Tomoterapia Seriale

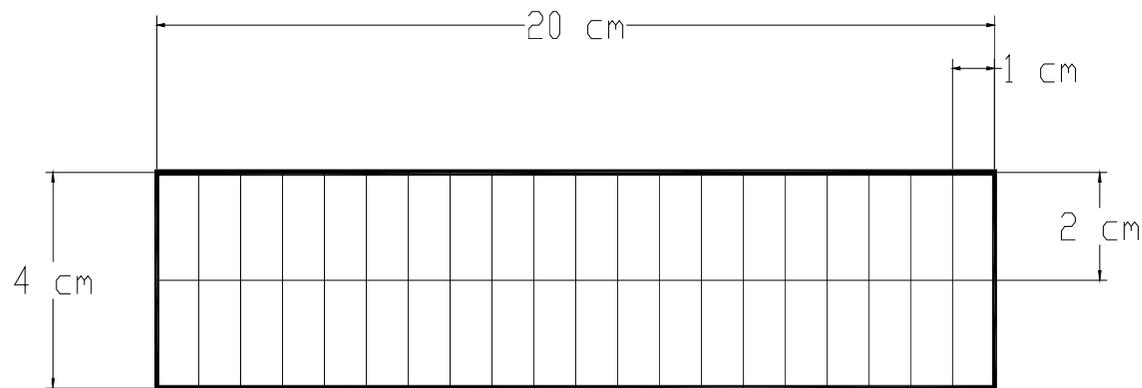
- Le slices sono irraggiate come cilindri (20cm diametro x 2, 4cm - 4mm di spessore) campo = 20x 30



Tomoterapia Seriale : il MLC binario

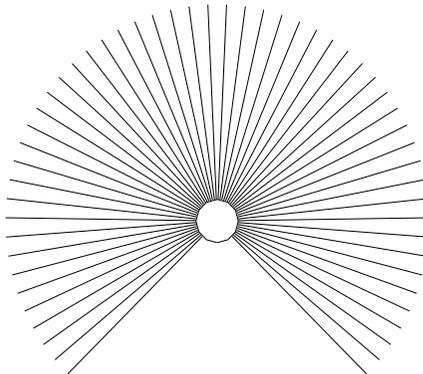
MLC binario significa :

- modalita' binaria, le lamelle possono essere aperte o chiuse
- ogni lamella definisce un pencil beam
- **il totale del tempo in cui la lamella e' aperta (su di un arco di 5°) determina l'intensita' del fascio.**

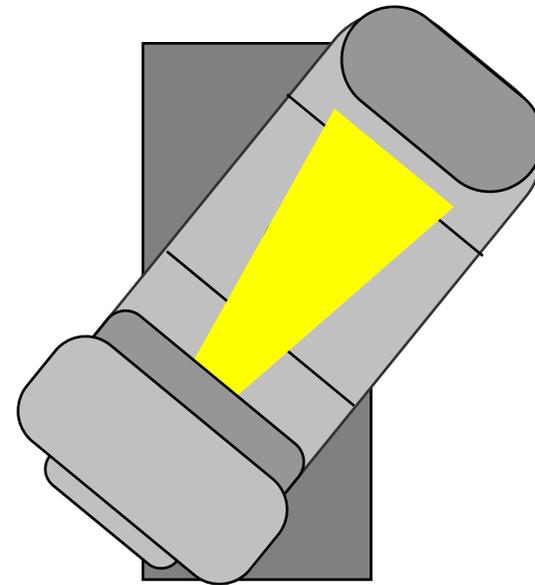
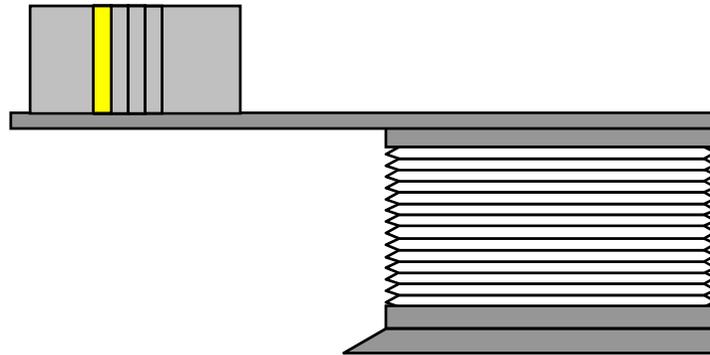
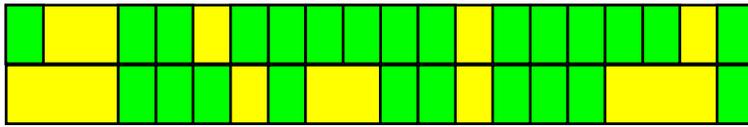


Tomoterapia Seriale

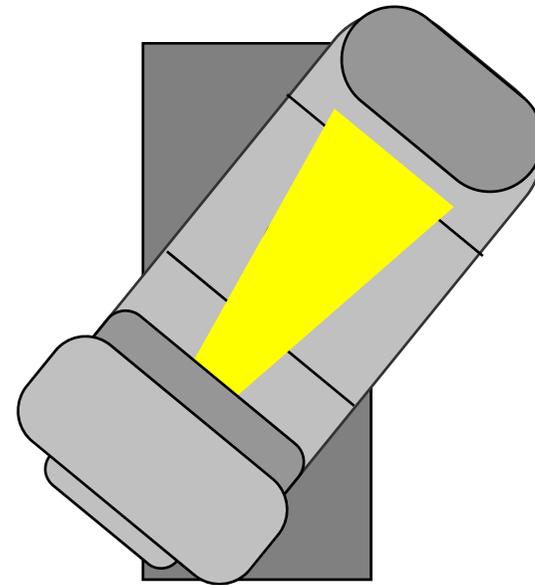
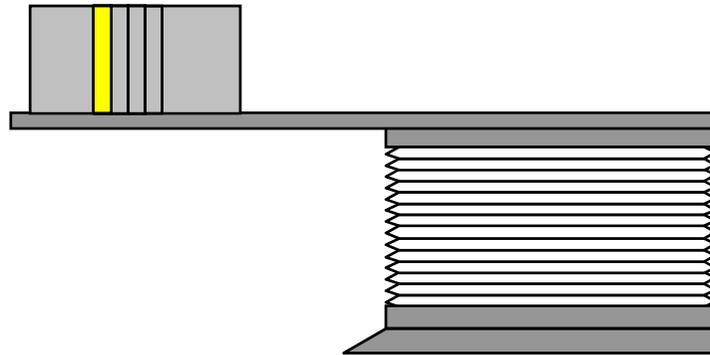
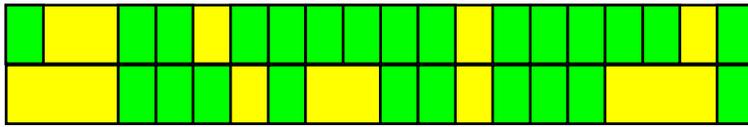
- I singoli fascetti intercettano il paziente da ogni angolo
- il gantry ruota dinamicamente
- i campi possono essere erogati ogni 5 o 10 gradi, parametro che e' selezionabile durante il processo di pianificazione
- sino a 2560 pencil beams erogati per arco



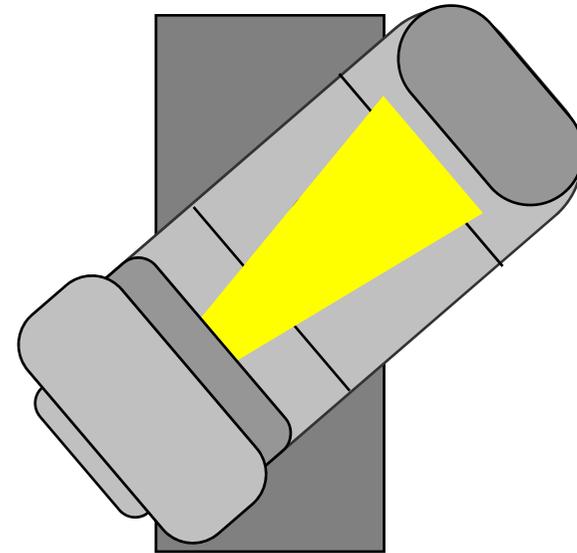
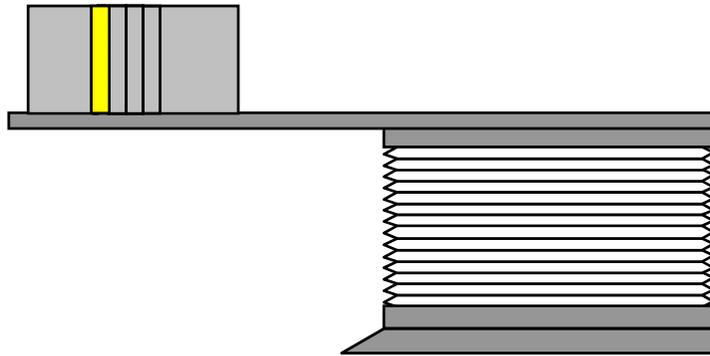
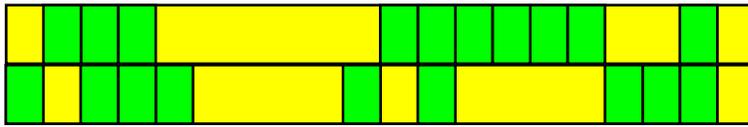
Serial Tomotherapy



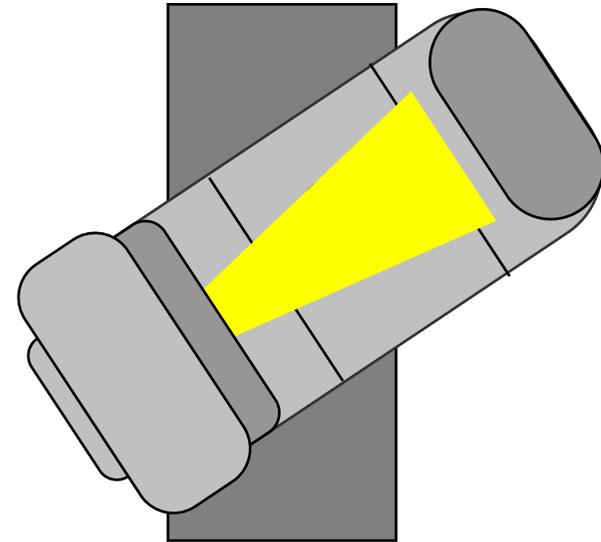
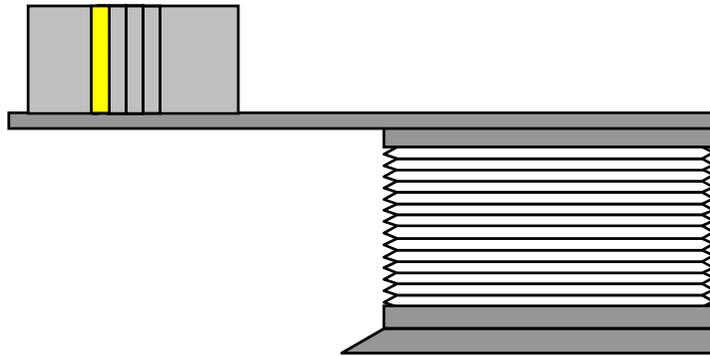
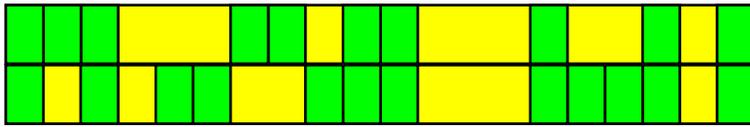
Serial Tomotherapy



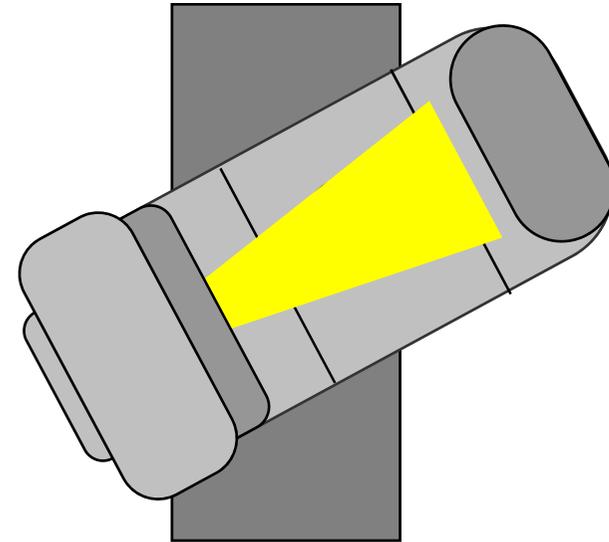
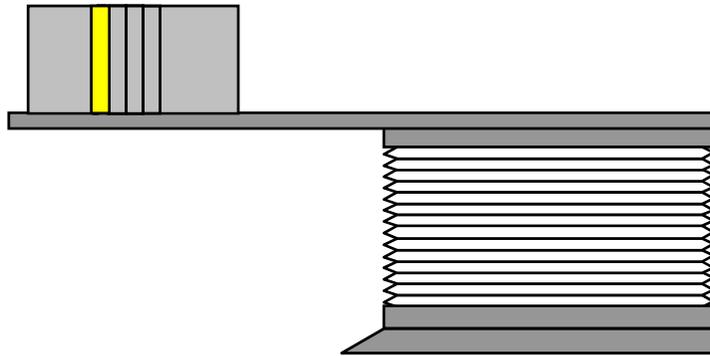
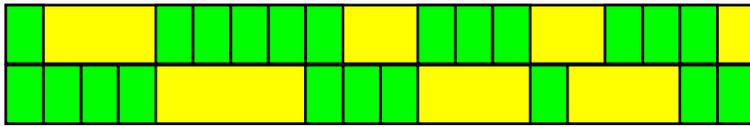
Serial Tomotherapy



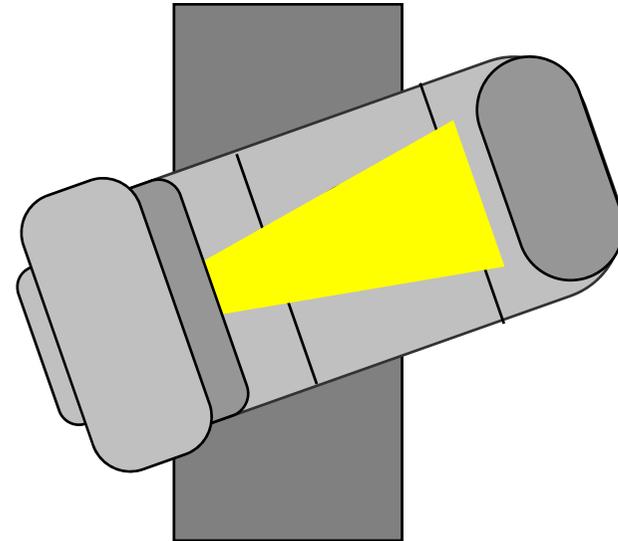
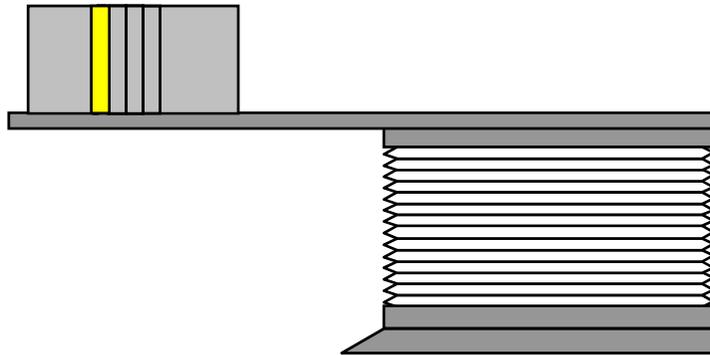
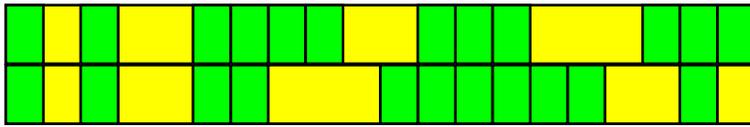
Serial Tomotherapy



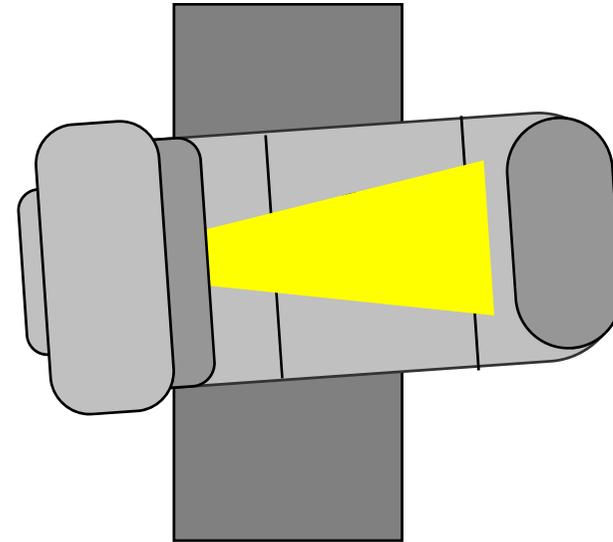
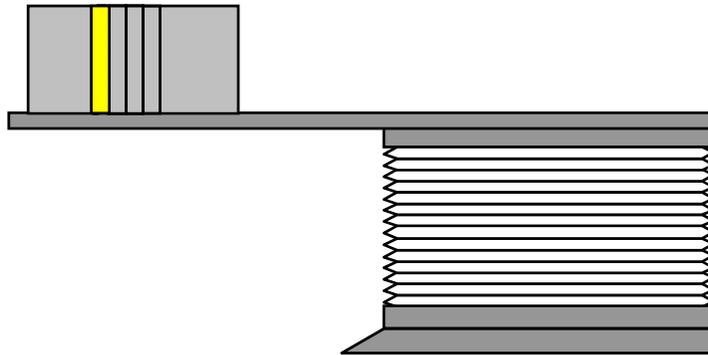
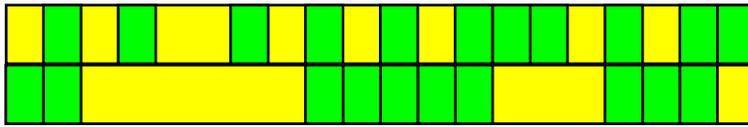
Serial Tomotherapy



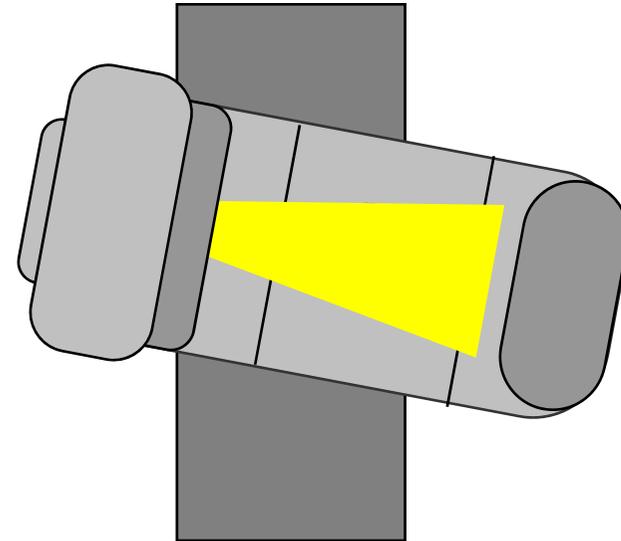
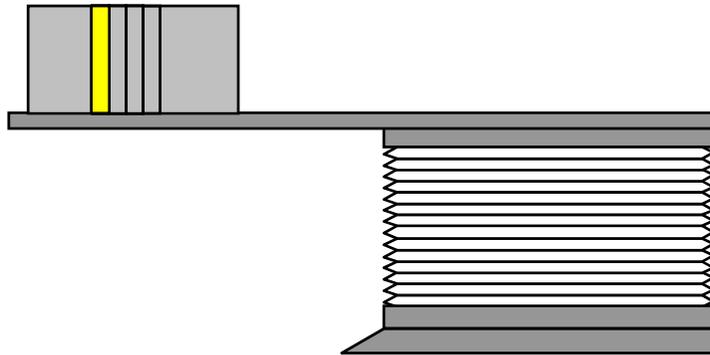
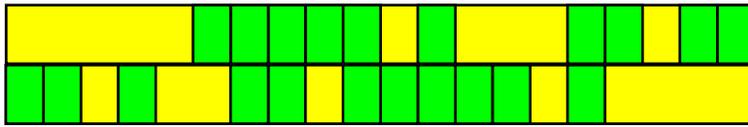
Serial Tomotherapy



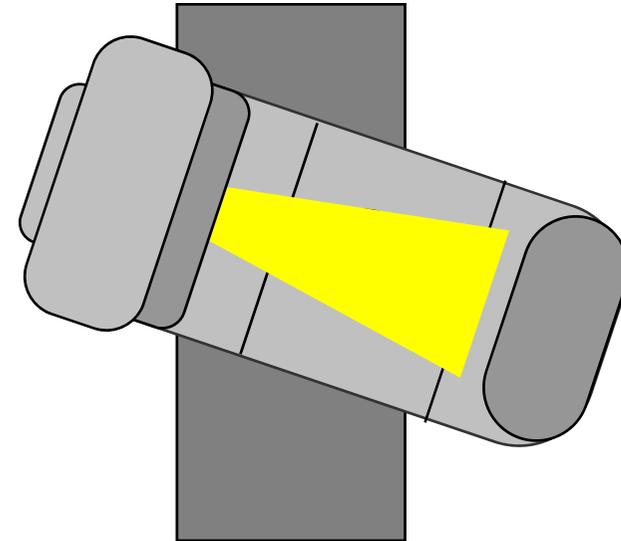
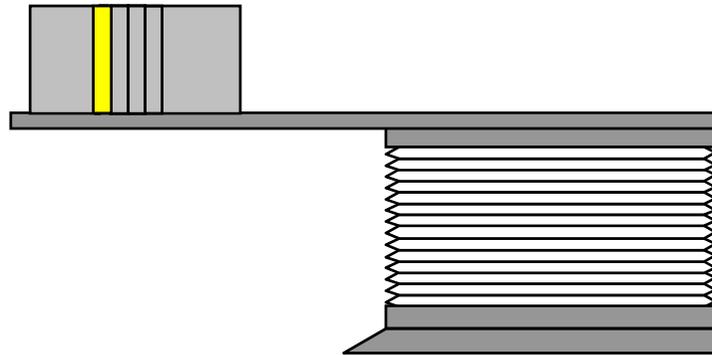
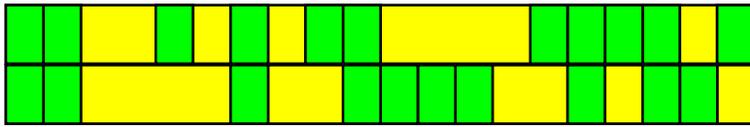
Serial Tomotherapy



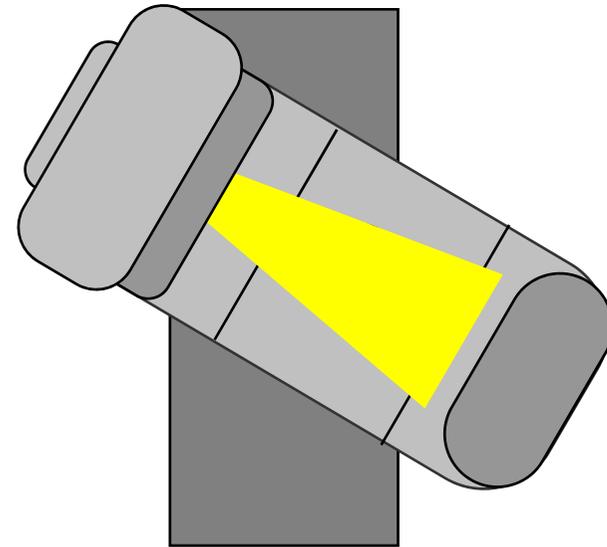
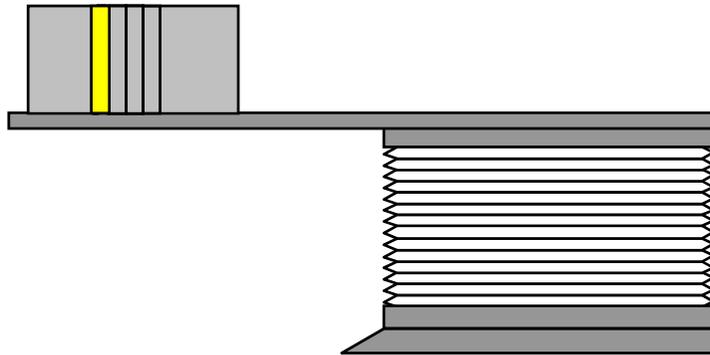
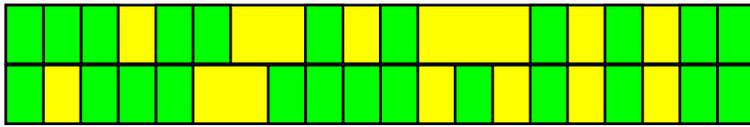
Serial Tomotherapy



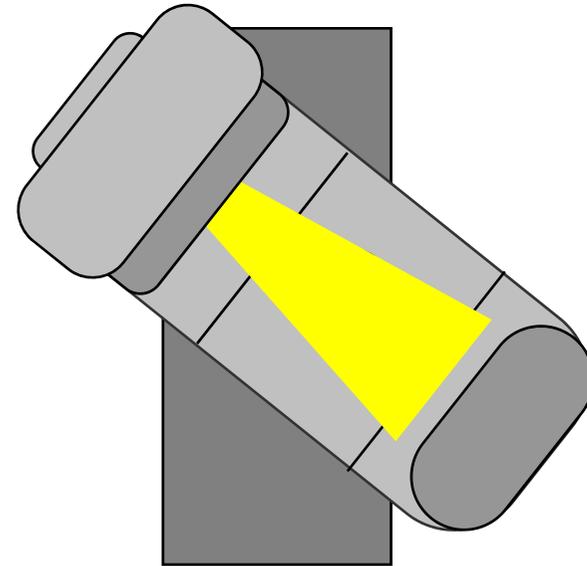
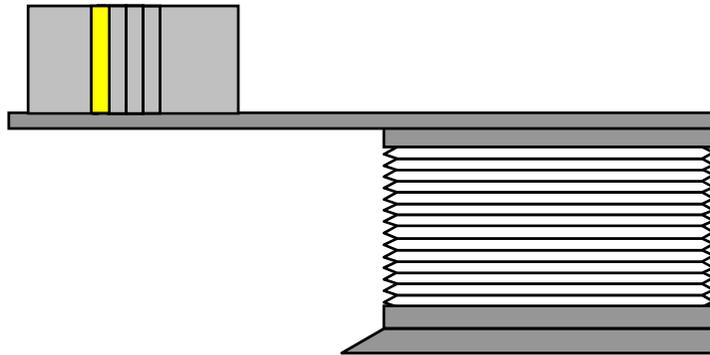
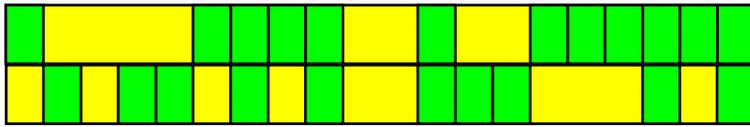
Serial Tomotherapy



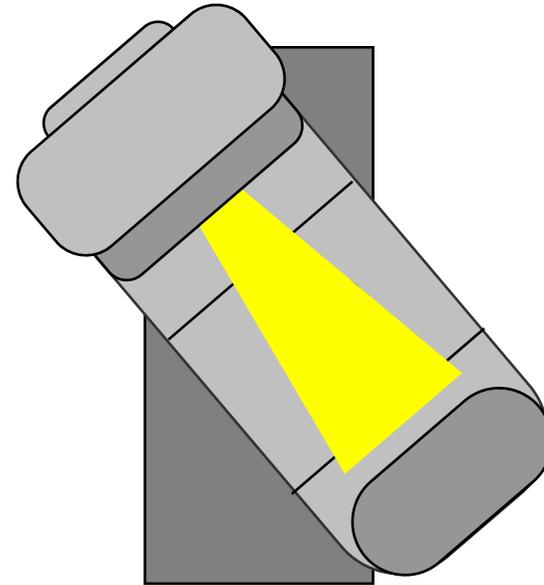
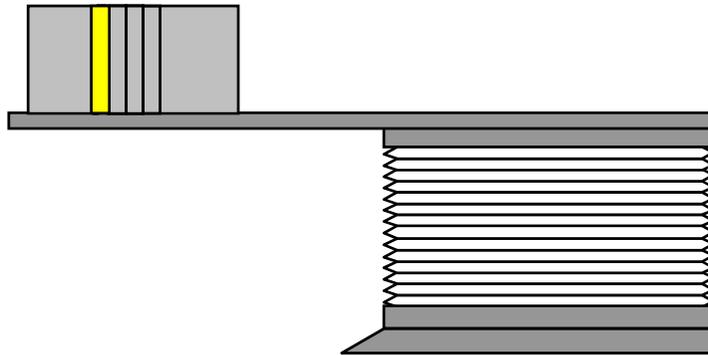
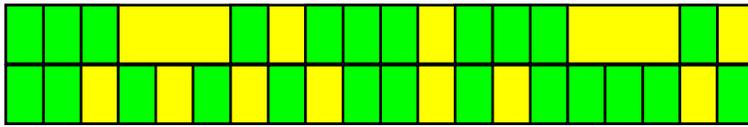
Serial Tomotherapy



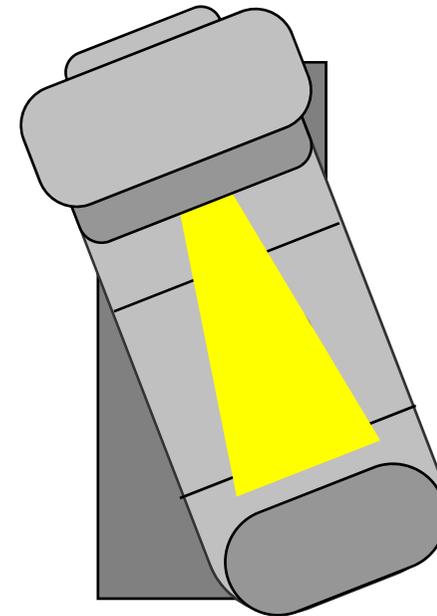
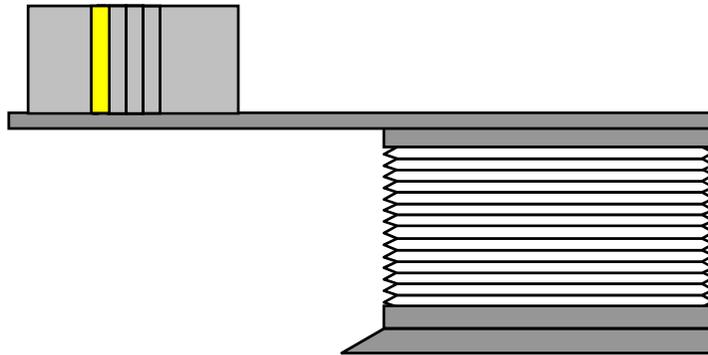
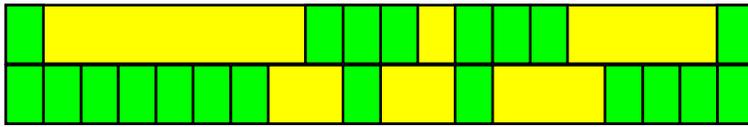
Serial Tomotherapy



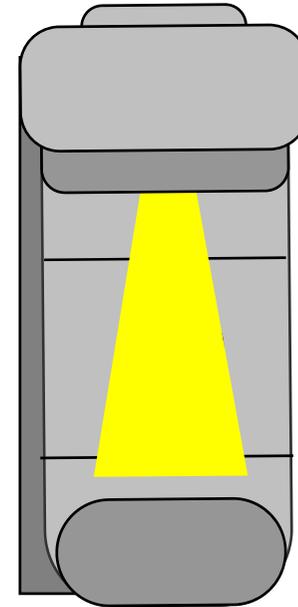
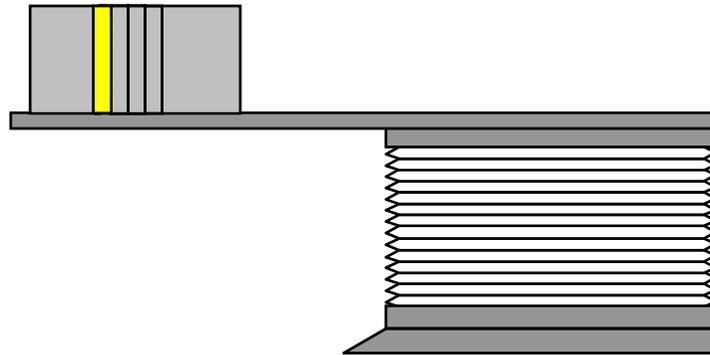
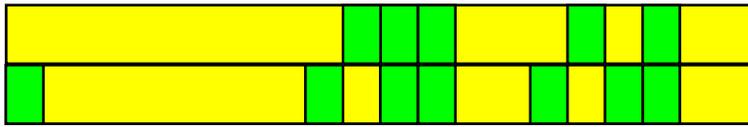
Serial Tomotherapy



Serial Tomotherapy



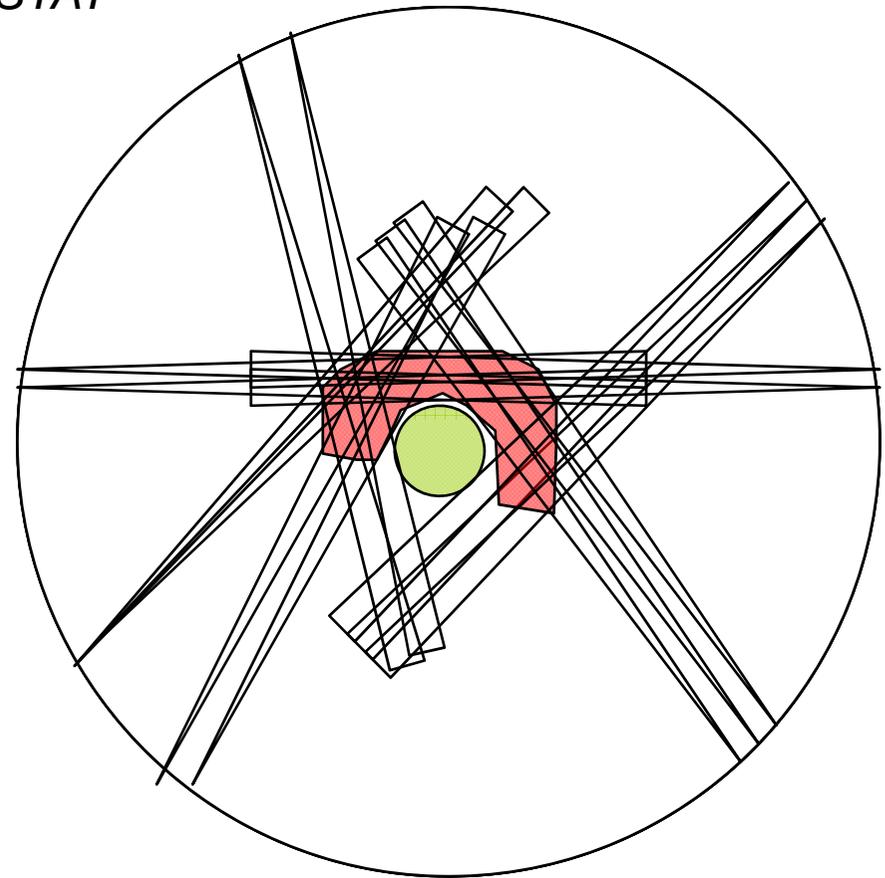
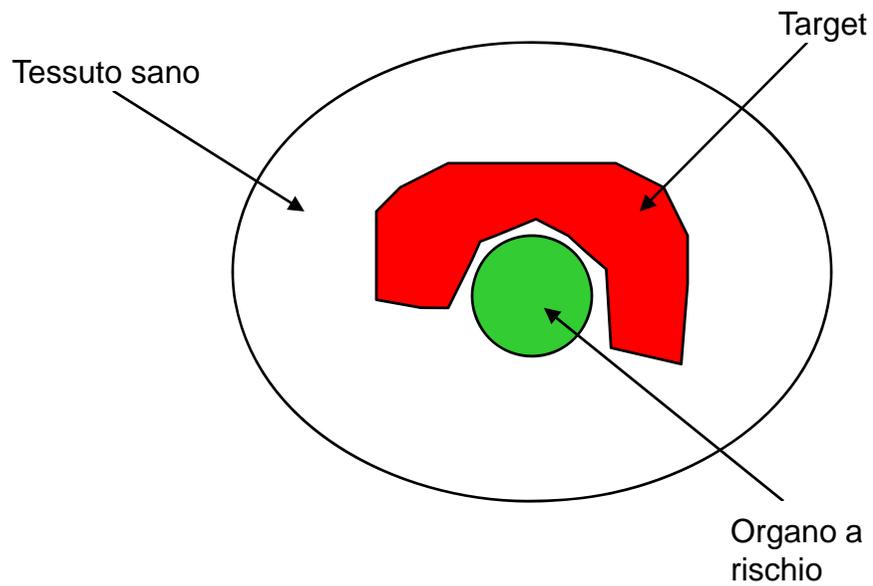
Serial Tomotherapy



Tomoterapia Seriale

Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT)

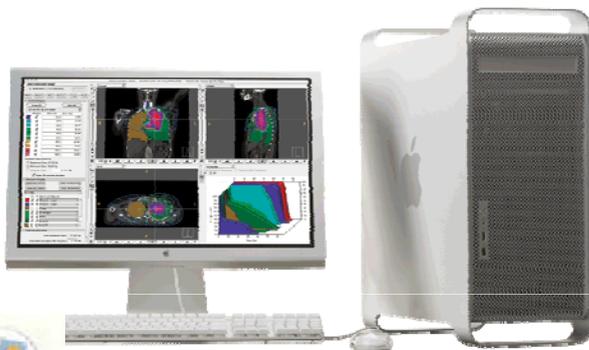
Trattamento impiegando il sistema nomos*STAT*



Gli elementi della Tomoterapia seriale: nomosSTAT: MLC



- Collimatore multilamellare (*add-on component*) in grado di erogare migliaia di pencil beams modulati
- Facile da agganciare (< 5 min., < 18 kg.), sicurezza nella qualità del trattamento, nella operatività e nella manutenzione.
- Modalità binaria (20 coppie di lamelle),
- Movimentazione pneumatica (assenza di motori)
- Velocità delle lamelle : 50 cm/sec
- La somma del leakage intralamellare e della trasmissione attraverso le lamelle è inferiore all' 1%



CORVUS Inverse Planning System

I tools più avanzati per pianificazione IMRT :

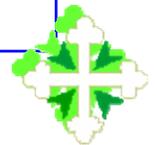
ActiveRx

nFUSION

FAST IMRT Algoritmi di ottimizzazione multipli

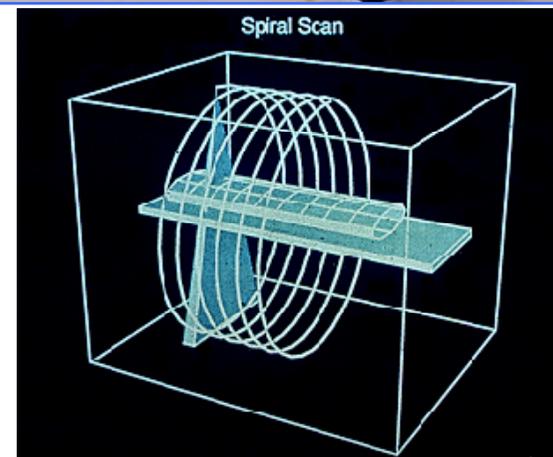
Griglia di calcolo sino a 1mm³

PEREGRINE Monte Carlo Dose Calculation



TOMOTERAPIA ELICOIDALE (TE)

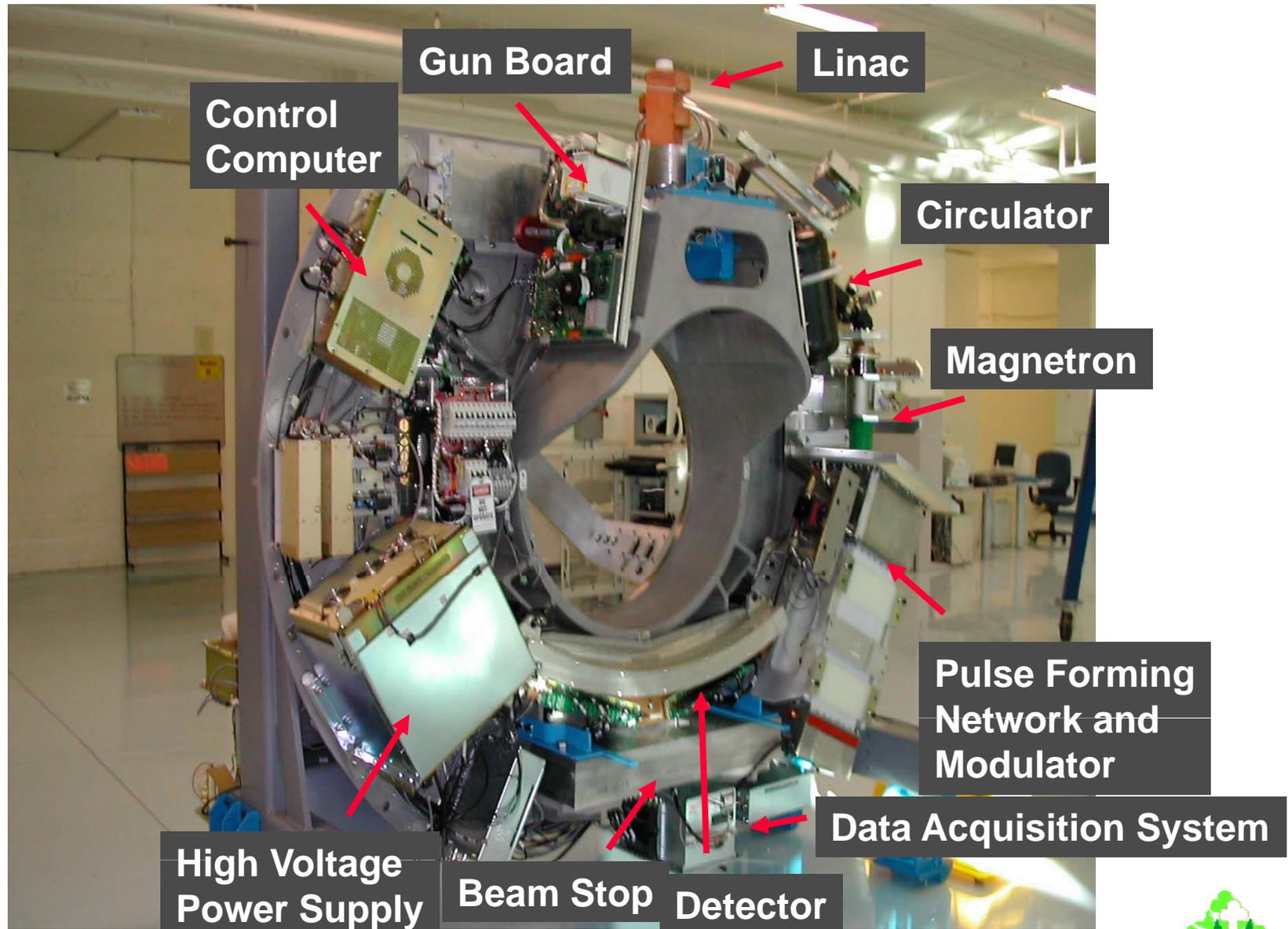
La Tomoterapia Elicoidale (TE), realizzata nel 2000, integra in un sistema compatto, progettato ex novo, tutte le esperienze tecnologiche dell'evoluzione in corso: **un linac tecnica elicoidale di emissione del fascio, IMRT con MLC di tipo binario, IGRT con MVTAC a spirale incorporata e calcolo della distribuzione di dose con "Inverse Planning"**.



TOMOTERAPIA ELICOIALE (HiArt)



TE – Stativo : Interno



TE – Acceleratore lineare: Sistema di emissione del fascio – Confronto con linac tradizionale

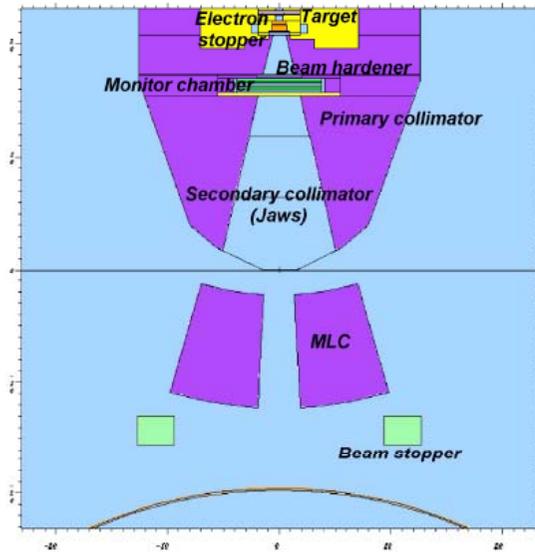
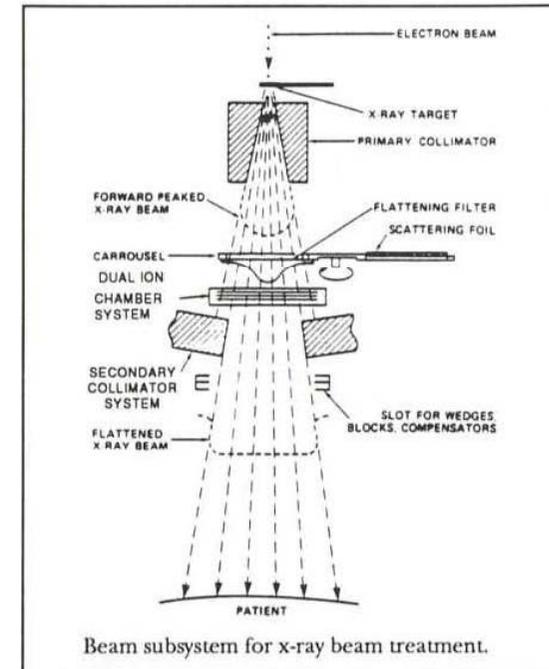
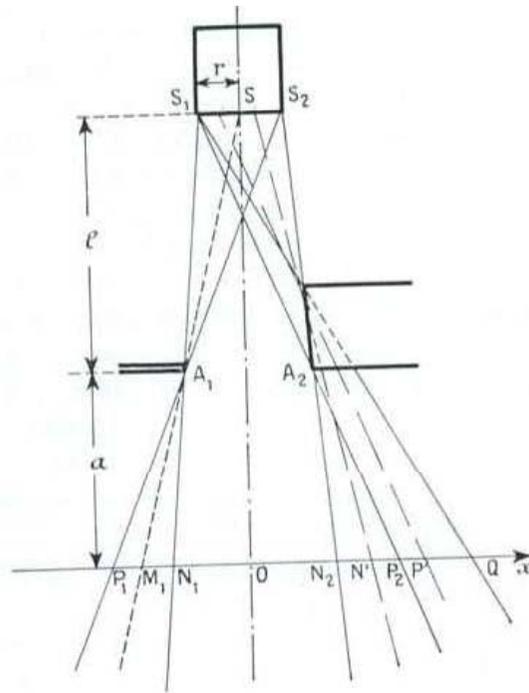


Fig. 1. Model of the helical tomotherapy unit as used in the Monte Carlo simulations. No geometrical or material simplifications were introduced in order to avoid systematic errors in the results. Different structures within the head are marked. The phase space scoring plane below the primary collimator is shown.



Il diametro della macchia focale del target è di 1,5 mm. per ridurre la penombra e migliorare la qualità d'immagine e la precisione del trattamento (gli acceleratori lineari hanno una macchia focale di diametro di 3 mm.). **L'acceleratore della TE non ha il filtro equalizzatore: ha una maggior purezza del fascio (in soli fotoni senza contaminazioni di scatter e di componenti elettroniche) all'interno ed all'esterno del campo e lo spettro si mantiene pressocchè costante per l'intero fascio.**



TE – Acceleratore lineare: Caratteristiche del fascio di trattamento – Profilo della fluenza in fotoni

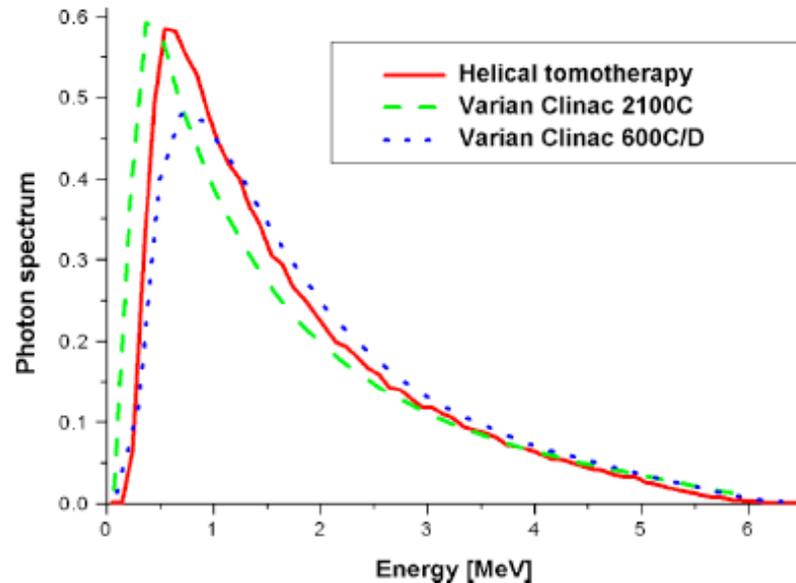


FIG. 3. Photon energy spectrum of helical tomotherapy, compared to two different Varian Clinac units, 2100C and 600C/D. All of the systems were set to have the same incident electron beam (incident energy 6 ± 0.5 MeV, 2 mm in diameter). The spectra are normalized to better show spectral char-

Rispetto al linac, la TE ha uno spettro più duro per la presenza di un beam hardener e per la mancanza di flatness filter. L'energia media del fascio di fotoni è 1,49 MeV

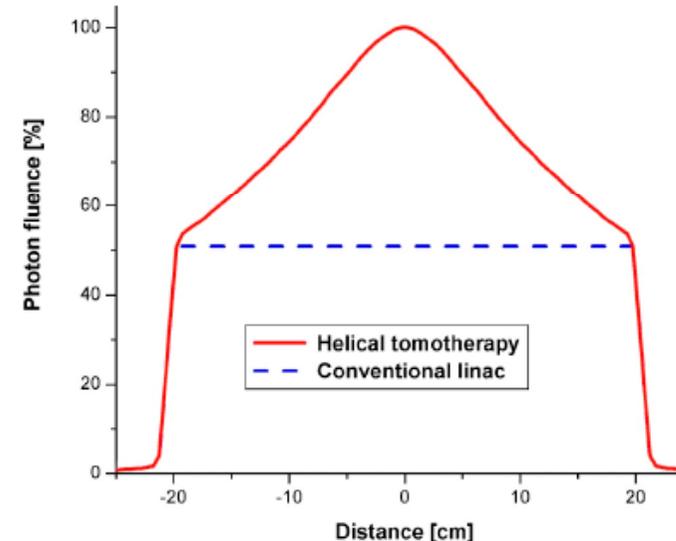


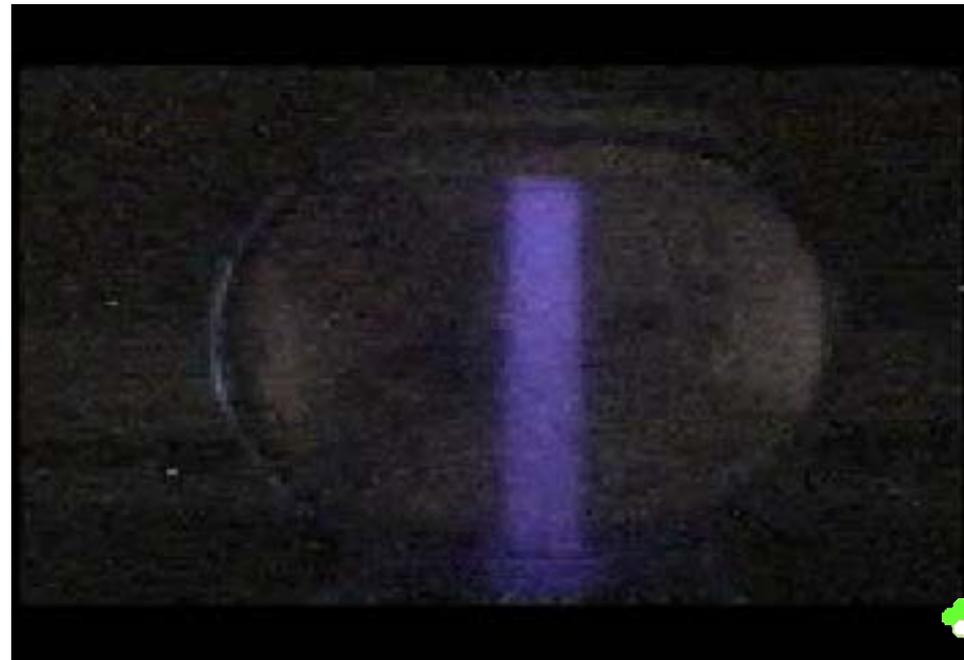
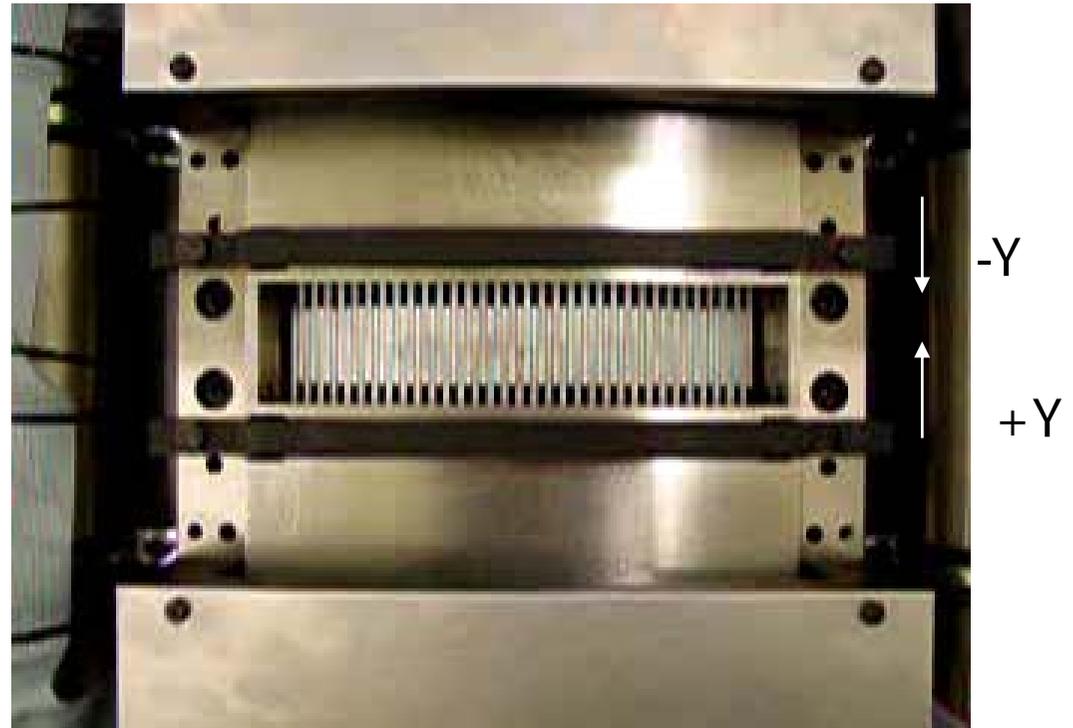
FIG. 6. The transverse (in-slice) photon fluence profile of the helical tomotherapy treatment beam. The characteristic conical shape of the profile is notable, which, on the contrary to the conventional treatment units (dashed), results in almost doubled photon fluence in the center of the beam.

Profilo trasversale (lungo la direzione X) , con mancanza di flattening filter, confrontato con quello di un linac



TE - MLC

- di tipo binario, con posizione chiuso od aperto delle lamelle
- posizionato nel gantry
- 64 lamelle
- movimentate da aria compressa (senza trasduttori e motorini per ogni singola lamella) per una maggiore affidabilità e velocità di funzionamento
- collimazione del fascio nella direzione (x)
- tempo di chiusura lamella: < 25 ms per uno spazio di 5 cm.

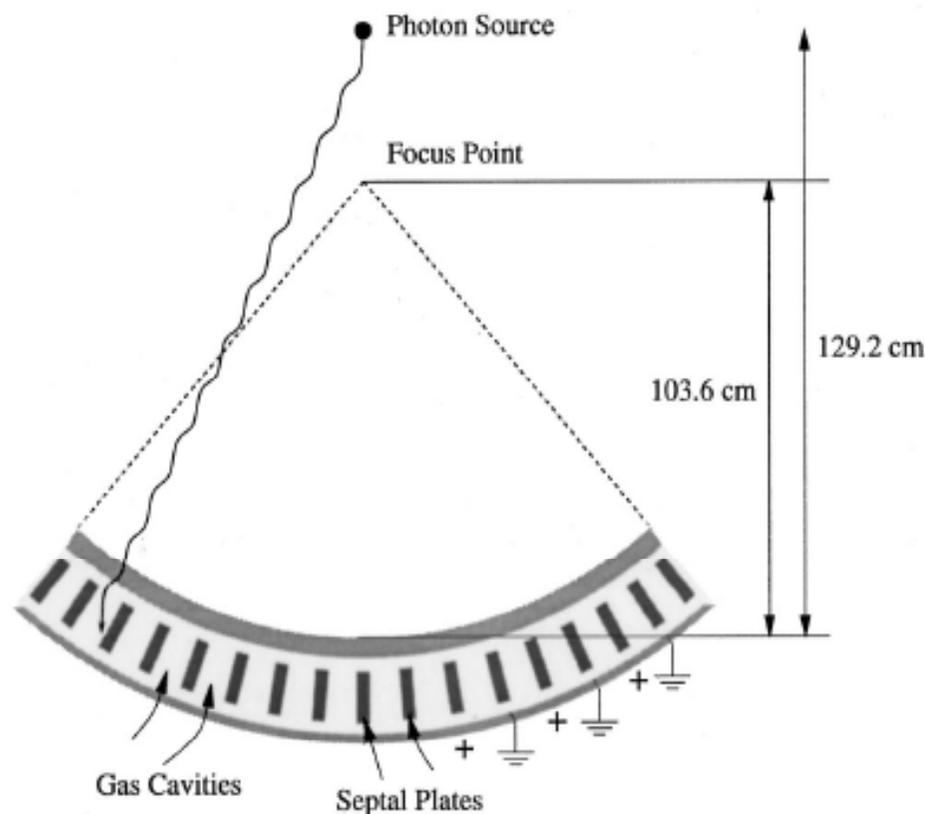


TE – Funzionamento del sistema come TAC

- Geometria imaging: a spirale
- Energia fascio raggi **X= 3 MV**; Emed = **1 MeV**
- Dose-rate: 2- 4 cGy/min
- Velocita' Rotazione max : 20 giri/minuto (pari a 1 giro ogni 3 sec)
- Apertura collimatore primario: 4mm.
- Posizione delle lamelle del MLC: tutte “open”
- Tempo di acquis. per slice inclusa ricostruz. e visualiz. : **2 secondi**
- **Apertura Gantry: 85 cm ; FOV: 40 cm**
- Lettino in fibre di carbonio: carico: 200 Kg;
- Precisione traslazione longitudinale del lettino: 0.25 mm
- CT ratio: lineare per tutte le densità
- Immagini MVCT con coregistrazione automatica (mutual information) con immagini KVCT
- Registrazione del paziente (**5 laser**) con 6 correzioni: X, Y, Z , rotazione, inclinazioni (nei 2 sensi)

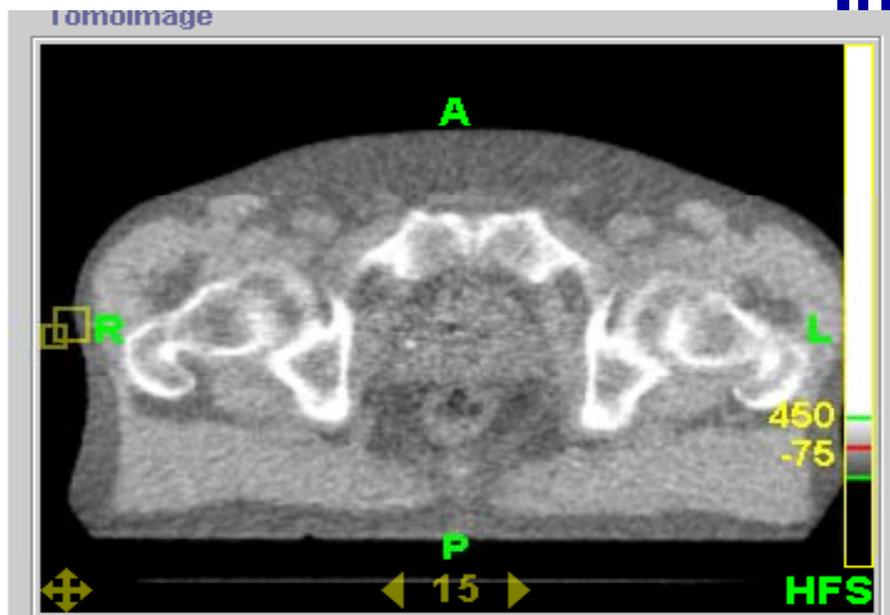


TE- Array di rivelatori TAC

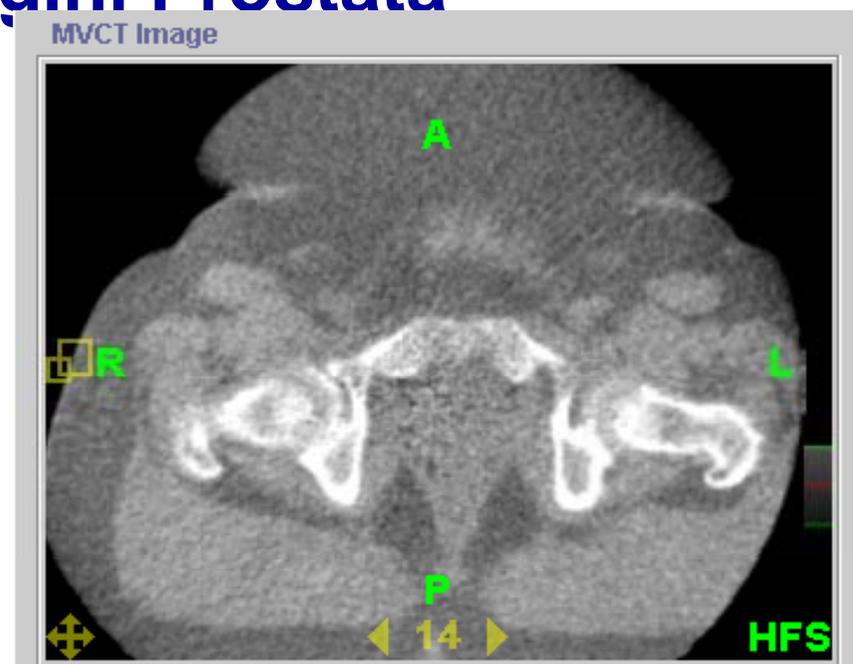
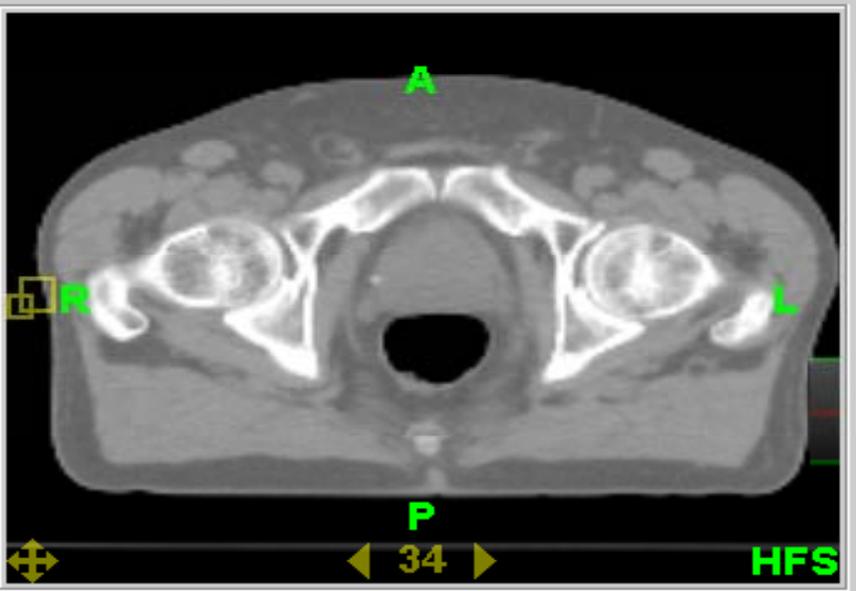


- Numero: **764** (utilizzati in media 500)
- Posizione: opposti alla sorgente:
- Disposizione: ad arco
- Dimensioni: arco di larghezza 120 cm (lungo l'asse X)
- Profondità (lungo asse Y): 5.4 cm
- Lunghezza (lungo asse Z): 2.54 cm
- La spaziatura fra le camere di ionizzazione (lungo l'asse X, da centro a centro): **1.21** mm
- Camere di ionizzazione Xenon: con sottili pareti di separazione in tungsteno
- Efficienza quantica: **25%**, (valore superiore a quello degli EPID).

TE –Acquisizione della MV CT Image Immagini Prostata



Reference Image



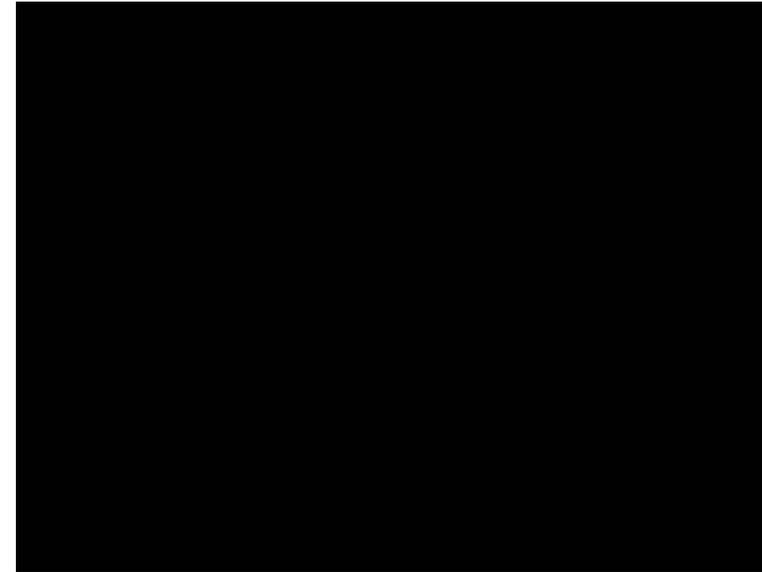
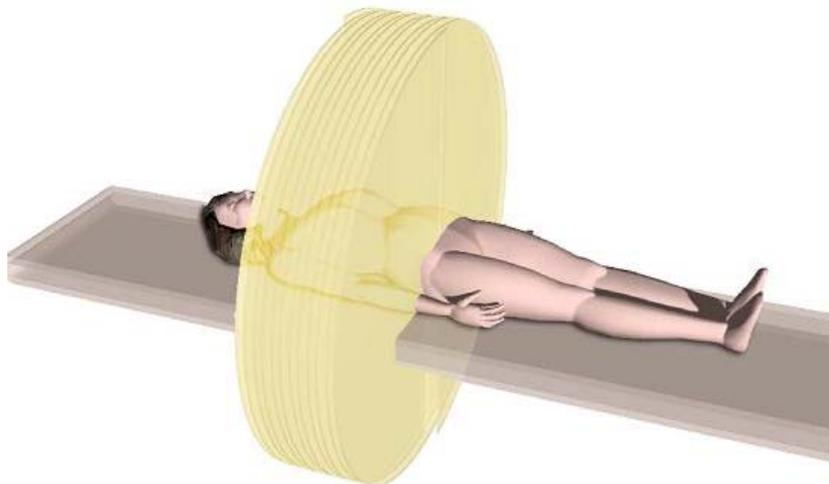
Reference Image



TE – Funzionamento come unità di trattamento

Il sistema di TE ha una tecnica “elicoidale” di erogazione, con una rotazione continua che nel planning si considera come composta da 51 segmenti di arco (paragonabili ad altrettante porte d’ingresso ogni circa 7°), con un fascio modulato dal movimento binario di 64 lamelle.

Il **beamlet** viene definito dal movimento della lamella dalla posizione chiusa alla posizione aperta e nuovamente alla posizione chiusa.

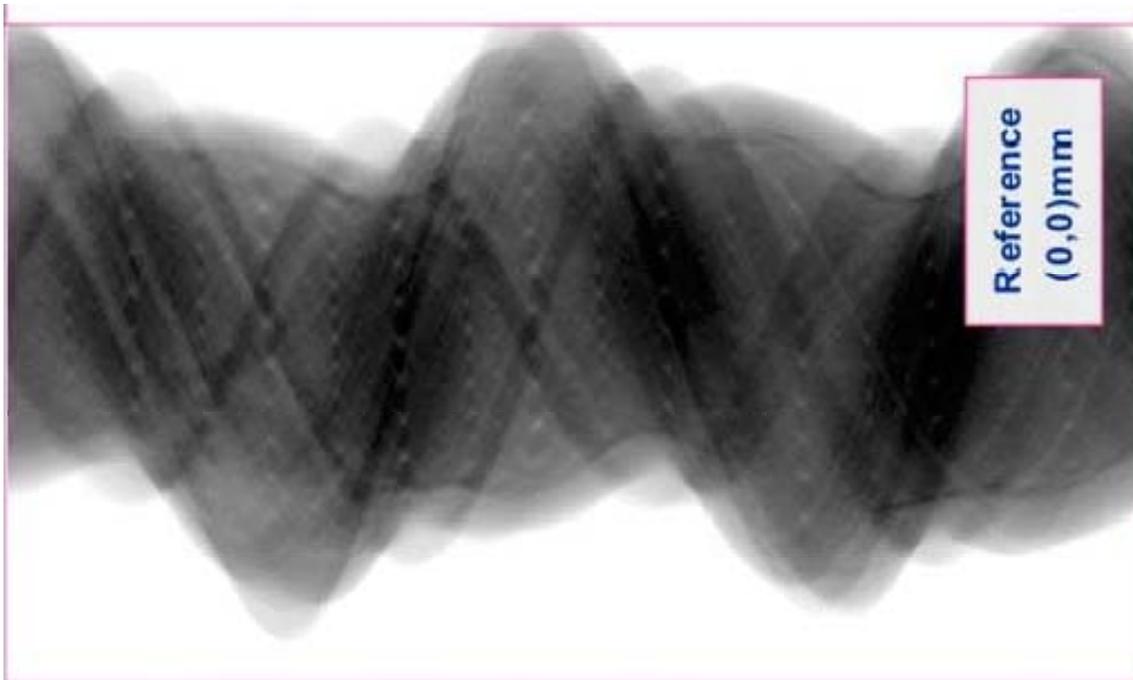
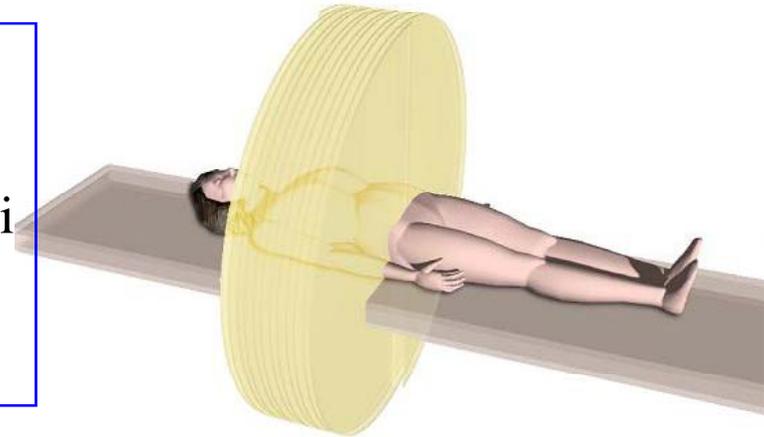


La più elevata intensità di dose del beamlet si ha quando la lamella si apre all’inizio del segmento di arco e si chiude alla fine del segmento di arco; la più bassa intensità di beamlet si ha quando si apre la lamella prima della metà del segmento di arco e si chiude appena superata la metà del segmento di arco

TE – Funzionamento come unità di trattamento

Il movimento continuo elicoidale della sorgente radiante permette:

- l'omogeneità della dose erogata senza problemi di giunzione dei campi
- campo di trattamento IMRT : 40x160 cm



A **sinogram** is an array of pencil beam intensity values as a function of gantry angle (vertical axis in this Figure). Each horizontal row corresponds to one angular view (first view from the bottom). The columns label each detector in the array

TE – Funzionamento come unità di trattamento

Emissione elicoidale continua – numero totale di beamlet con ipotesi di PTV (BEV) = 10x10 cm

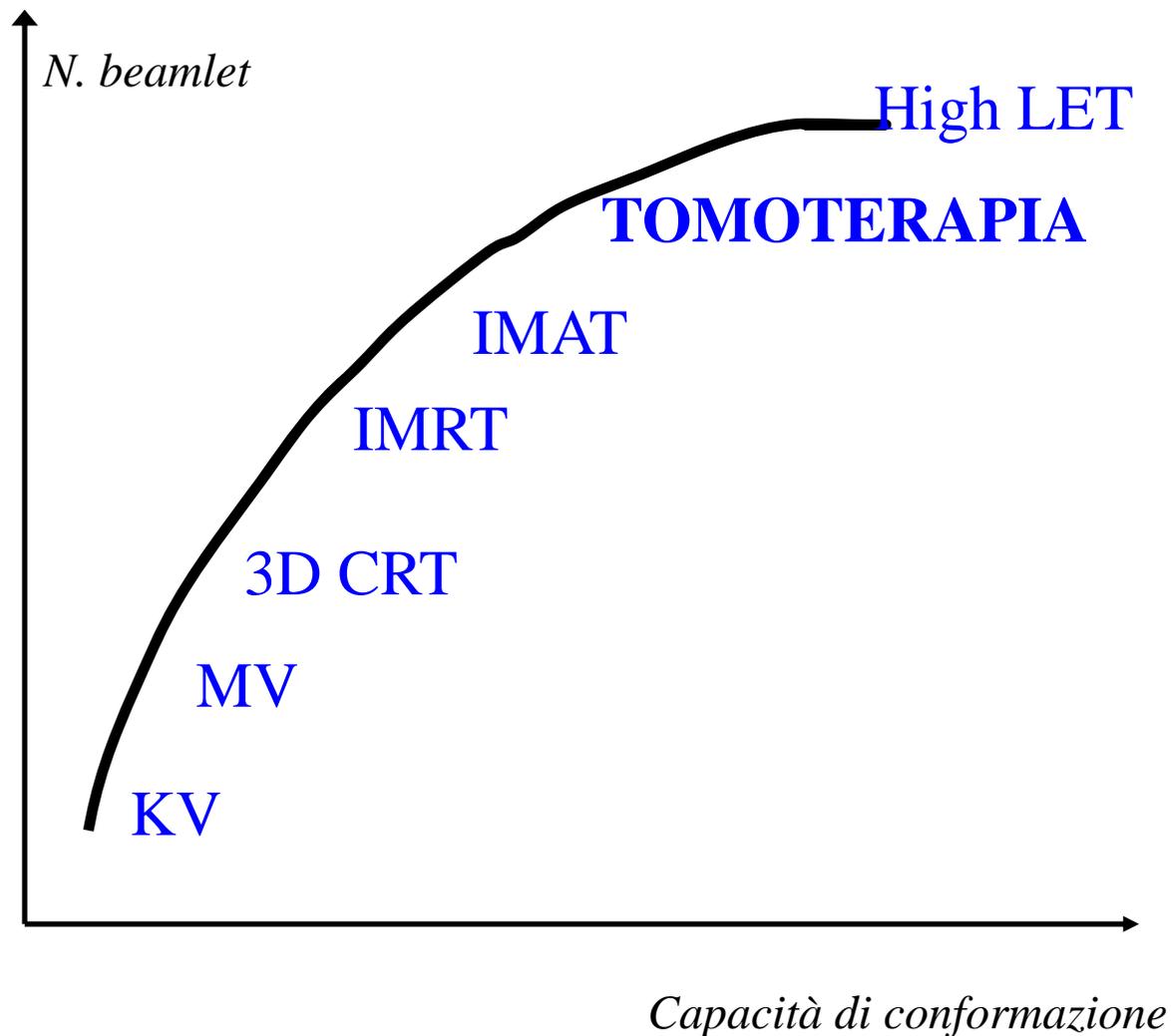
IMRT (7 campi statici)	N. campi : 5 – 9 Assumiamo N = 7 Dimensioni campi (BEV) : 10 x 10 cm Dimensioni beamlet (MLC) : 1 x 1 cm	Per N. campi = 7 N beamlet/campo = 100 N. totale beamlet = 700
Tomoterapia seriale	N. segmenti/pendolazione: 54 Spessore dello strato : 1 cm N. strati/ pendolazione : 2 N. pendolazioni per copertura PTV : 5 Larghezza lamella: 0,5 cm Dimensione Beamlet: : 1 cm x 0,5 cm N. Beamlet/segmento per copertura PTV: 40	N. beamlet/segmento= 40 N. segmenti/pend. = 54 N. pendolazioni=5 N. totale beamlet : 10.800
Tomoterapia elicoidale	Pitch = $1/4 = 0,25$ Spessore dello strato : 1 cm N. segmenti di arco/rotazione di 360°: 51 N. rotazioni per copertura PTV: 40 Larghezza lamella : 0,625 cm. Dimensione del Beamlet: 1 x 0,625 cm N. Beamlet/segmento per copertura PTV: 16	N.beamlet/segmento = 16 N. segmenti/rotaz. = 51 N. rotazioni = 40 N. tot. beamlet = 32.640

TE – Funzionamento come unità di trattamento con emissione elicoidale continua – Evoluzione delle tecniche d'irradiazione e conformazione del fascio con l'aumentare del N. totale dei campi e dei beamlet

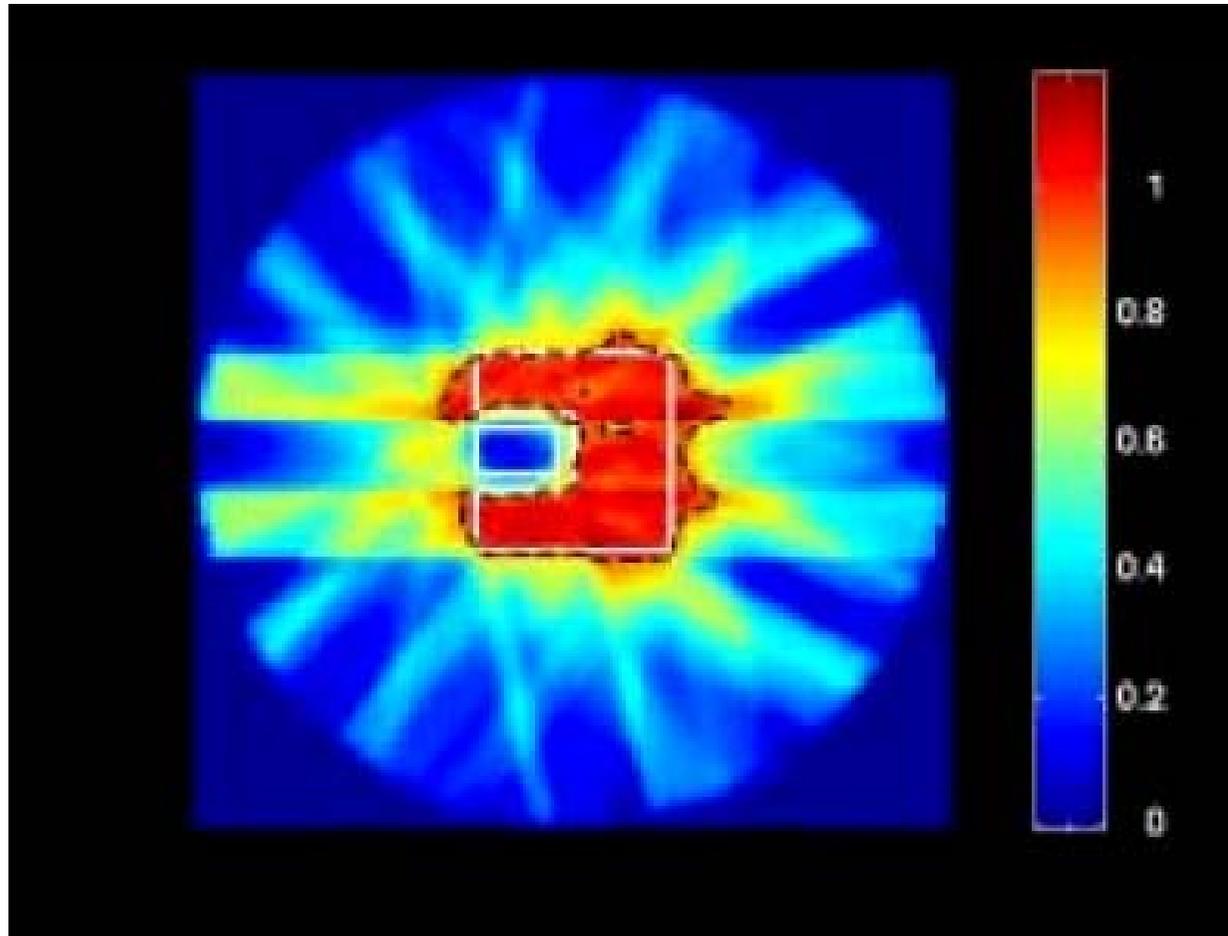
Maggiore capacità di conformazione con un maggior numero di beamlet

Migliore ottimizzazione con un maggior numero di gradi di libertà

Gradienti di dose più elevati



TE – Funzionamento come unità di trattamento



...e la Dose Integrale ?(ID)

E' definita come:

- L'integrale di dose rispetto al volume della regione considerata
- La dose media della regione moltiplicato il volume della regione considerata
- L'area sottesa dalla curva dell'istogramma differenziale dose assoluta -volume

D'Souza WD, Rosen II. Med Phys 2003; 30: 2065-2071

Comparazione dei dati di ID



Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 64, No. 3, pp. 962-967, 2006
Copyright © 2006 Elsevier Inc.
Printed in the USA. All rights reserved
0360-3016/06/\$-see front matter

doi:10.1016/j.ijrobp.2005.11.005

**Per l'energia da 20 MV manca il contributo alla DI
dovuto ai neutroni!**

Res
7.7
with

ulted in
mpared
ectively.

Tomo-IMRT further reduced these IDs by 11.9% and 16.5%, respectively. The 20 MV did not reduce IDs to those structures.

localized prostate cancer was demonstrated in regard to dose sparing of rectal wall and penile bulb while slightly decreasing NTID as compared with 6MV-3DCRT. © 2006 Elsevier Inc.

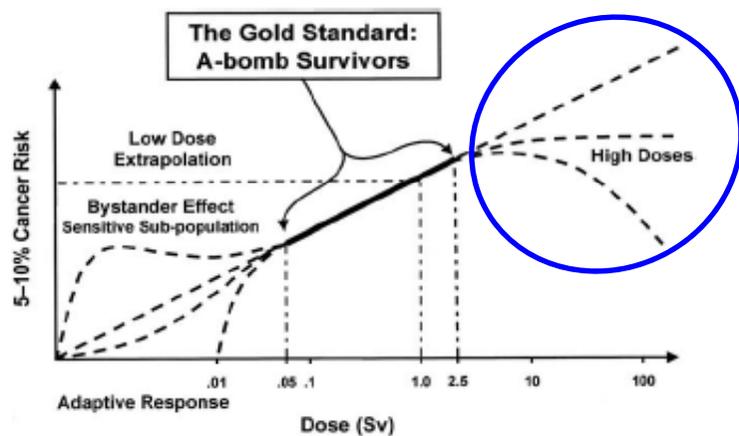
Radiation, IMRT, Tomotherapy, Prostrate cancer, Integral dose.

...è ancora corretto parlare di ID?

by Cossett and Schneider

Low dose Dose media in ogni organo ($< 2\text{Gy}$) \rightarrow *Dose Efficace*

Medium dose } No dose media (?)
perché siamo nella
zona dose-rischio \rightarrow *Organ Equivalent Dose*
High Dose } non lineare



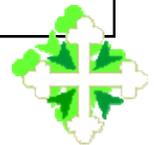
Per ciascuna distribuzione disomogenea in un organo, l'OED è la dose espressa in Gy, che causerebbe la stessa probabilità di danno che se fosse distribuita uniformemente nell'organo



Vantaggi: Adaptive Radiation Therapy



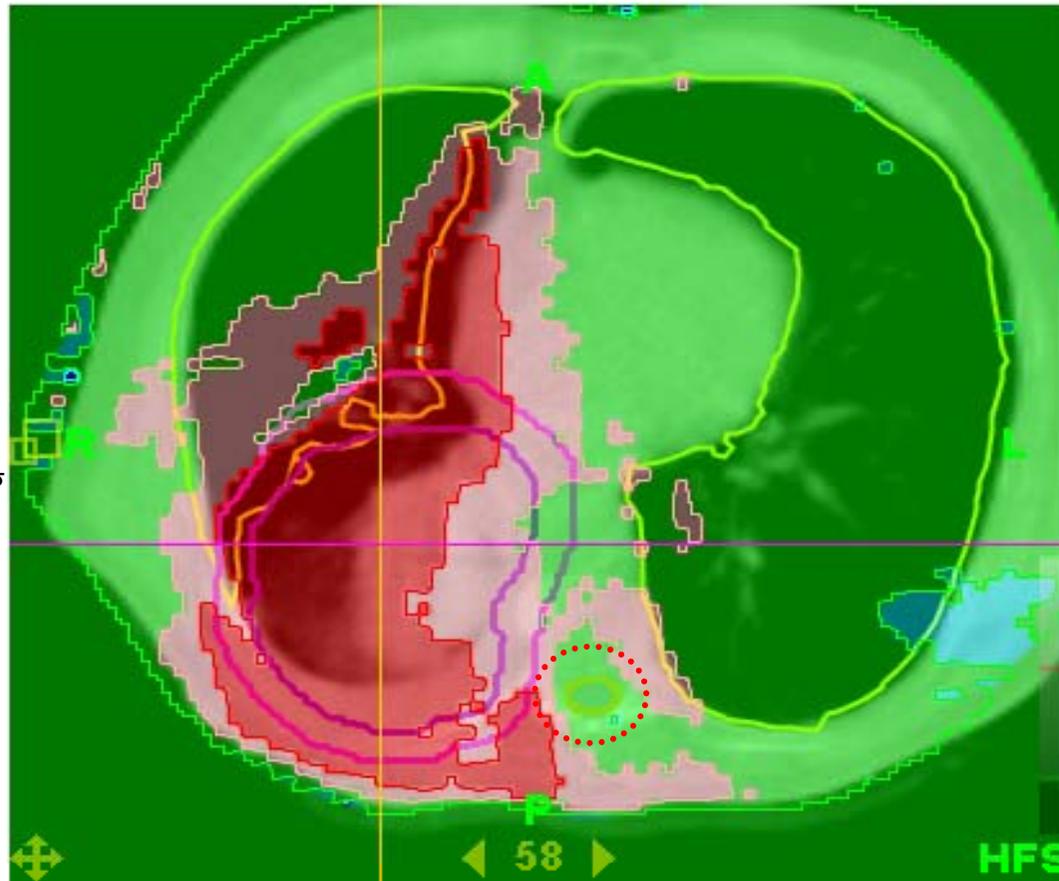
Se il tumore si riduce o se il contorno del paziente cambia durante la terapia radiante è possibile ri-pianificare il trattamento (cercando di mantenere bassa la tossicità mantenendo il controllo locale)



Assurance

Because you
can accurately
calculate dose
on the daily CT.

TomoTherapy, Inc. Hi-ART[®]
MVCT images are used for
accurate dose calculation
with heterogeneity
correction



Dose calculated on last days anatomy minus the original planned dose
Green = no difference in plan vs. treatment dose

Images courtesy of Timothy Holmes, PhD.
St. Agnes Cancer Center Baltimore, MD

Timely treatment evaluation & assurance

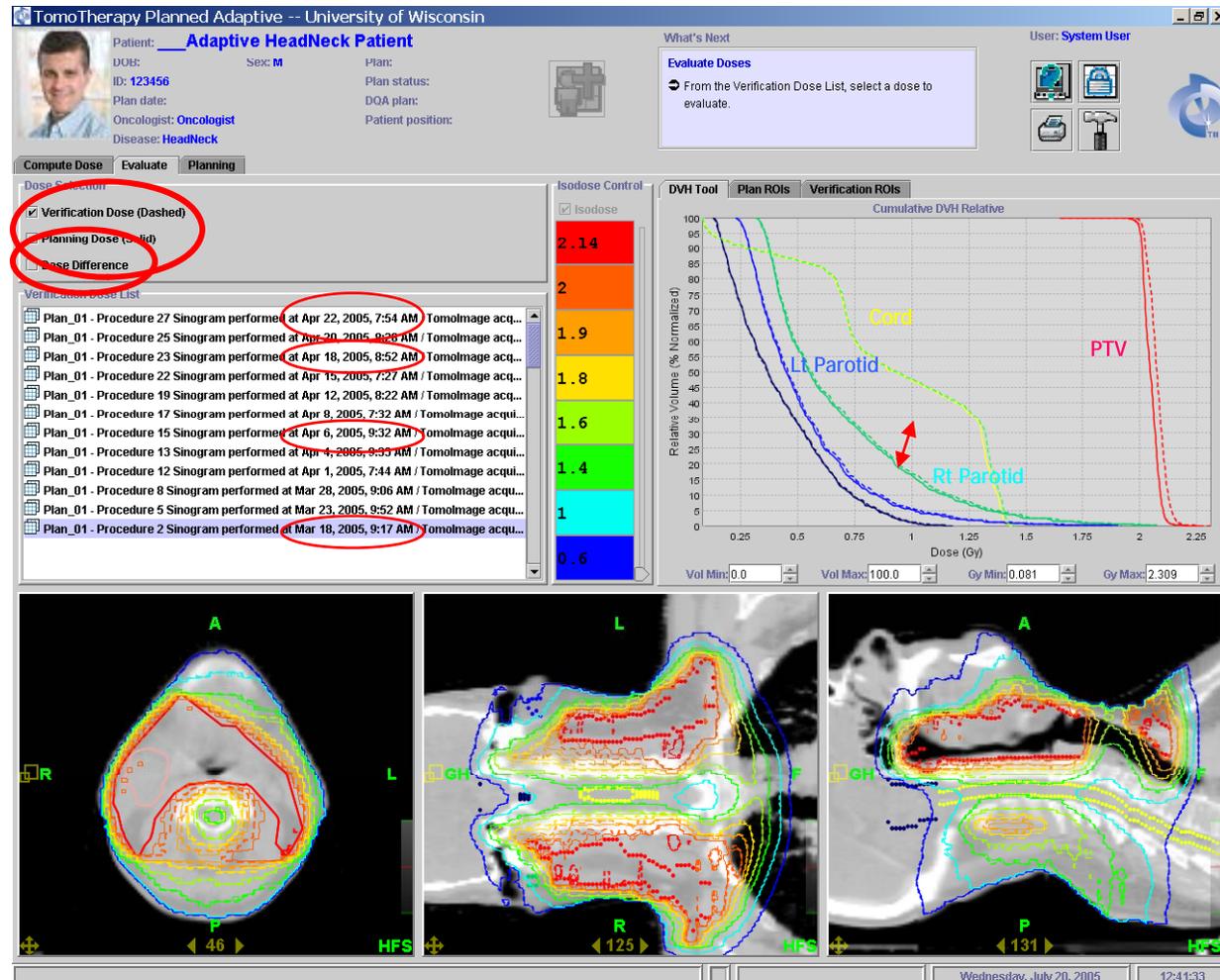
Step 2:
Evaluate treatments

Verification Dose
Patients treatment
calculated on the daily
anatomy (MVCT)

Planning Dose
Original planned dose

Review fractions as
they progress

Display Differences



Images courtesy of Timothy Holmes, PhD.
St. Agnes Cancer Center Baltimore, MD

Dose Summation

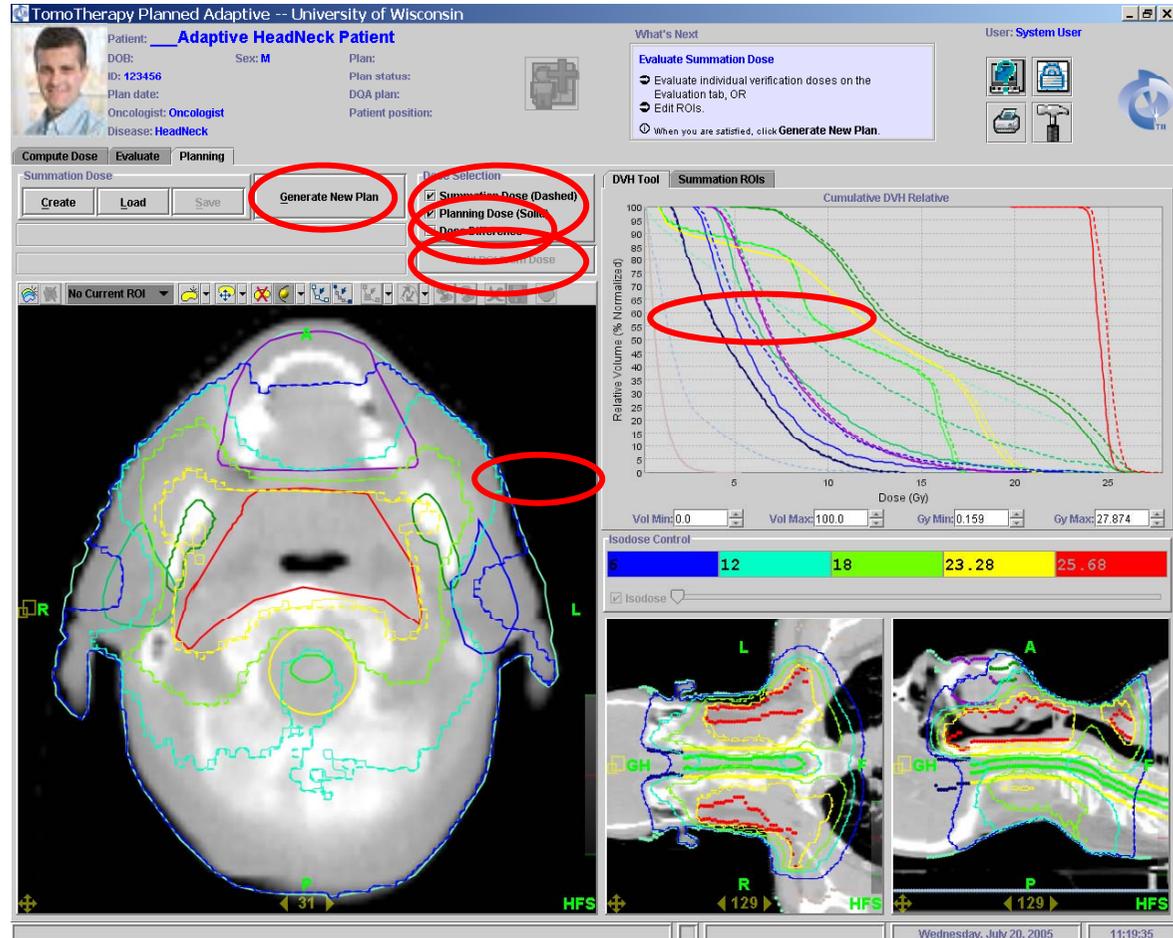
Step 3:
Summate multiple fractions for evaluation

View the summation of multiple verification doses

Compare to the original plan

Create contours from hot or cold spots in a particular structure

Proceed to adaptive plan



Images courtesy of Timothy Holmes, PhD.
St. Agnes Cancer Center Baltimore, MD

Tomotherapy Process

