

Tomotherapy HI-Art System (Highly-Integrated Adaptive Radiotherapy)

Applicazioni della Fisica alla Medicina | Laurea Magistrale in Fisica
Università degli studi di Milano-Bicocca

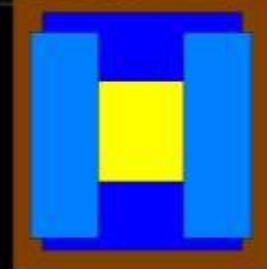
INDICE

- Cenni introduttivi sulla tecnica IMRT
- Caratterizzazione meccanica e dosimetrica del sistema Tomotherapy HI-Art
- Caratteristiche del sistema MVCT integrato
- Commissioning di un sistema di Tomoterapia Elicoidale
- Sistema di pianificazione
- QA paziente: dosimetria pre-clinica

Evoluzione della Radioterapia

1960's

The First Clinac
Collimator Standard



Primo Linac,
acceleratore
lineare
isocentrico.
Collimazione
standard.
Riduzione delle
complicazioni ai
tessuti normali
rispetto a unità di
Co-60.

1970's

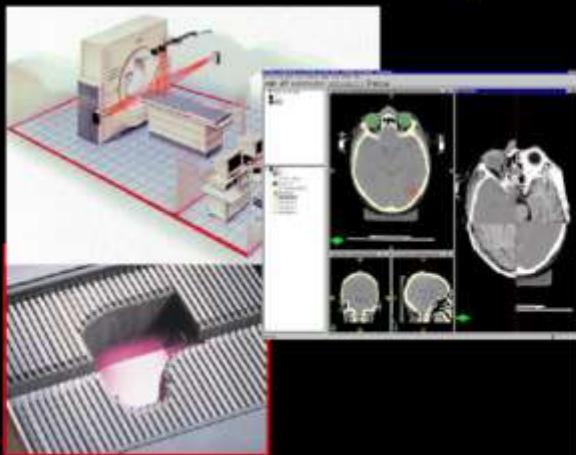
Cerrobend Blocking
Electron Blocking



Introduzione di
blocchi per ridurre
la dose ai tessuti
normali.
Introduzione dei
primi Linac con
elettroni per
trattamenti
superficiali.

1980's

Multileaf Collimator
Computerized 3D CT
Treatment Planning



3DCRT: Radioterapia
conformazionale 3D.
Introduzione delle
immagini TAC, di
sistemi computerizzati
di piani di trattamento
e introduzione del
MLC, per conformare
la distribuzione di
dose.

1990's

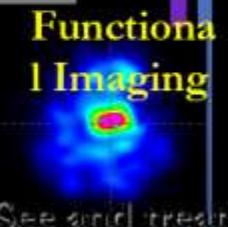
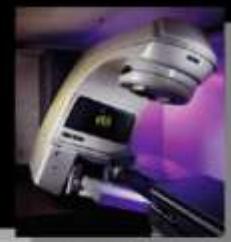
Dynamic MLC
and IMRT



Sviluppo di tecniche
IMRT: tecniche
efficienti per una dose
escalation al tumore con
una contemporanea
riduzione degli effetti ai
tessuti normali

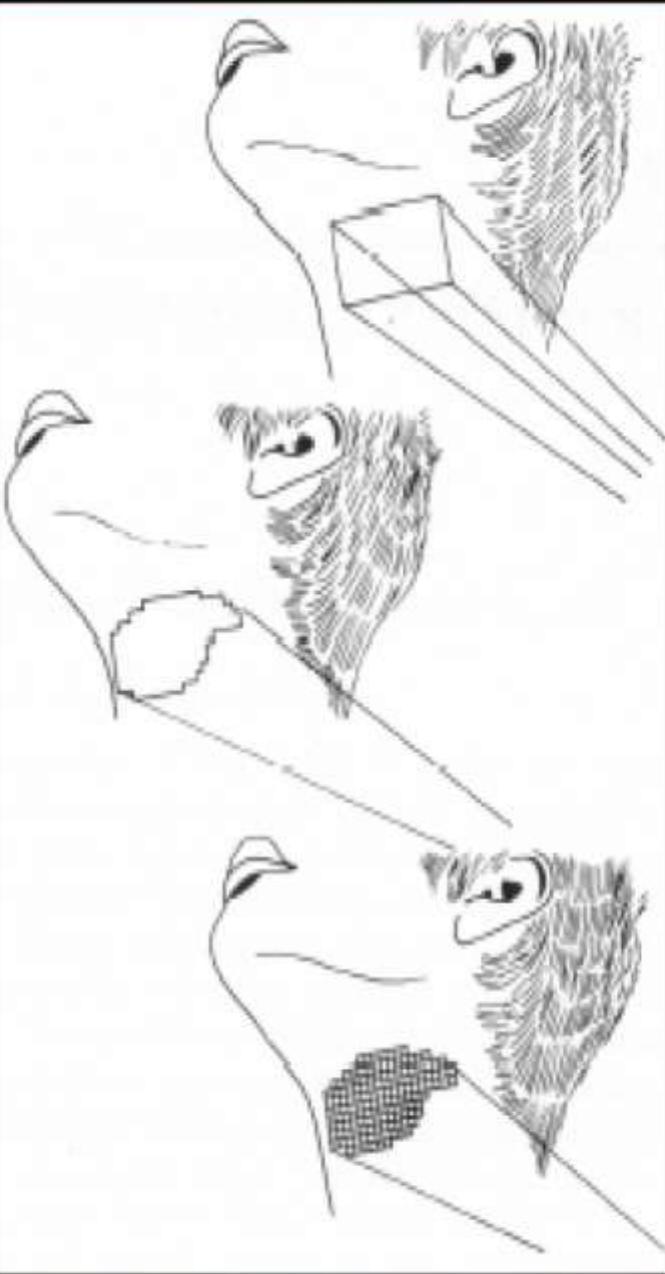
2000's

High
resolution
IMRT



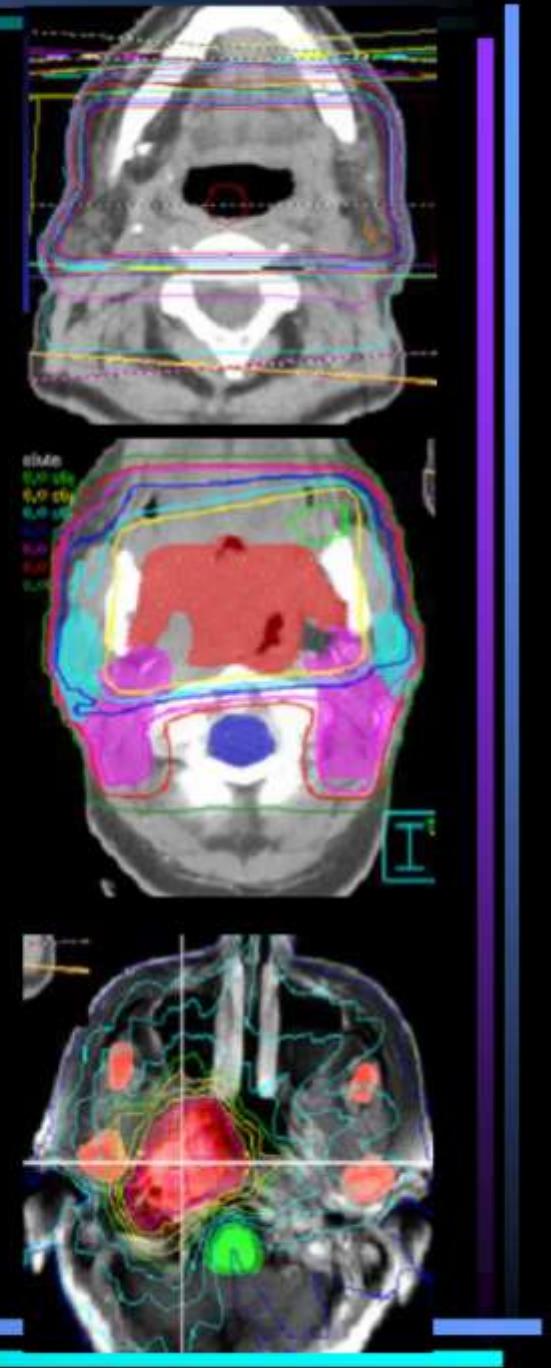
Evoluzione di
tecniche
IMRT: campi
sempre più
piccoli e
sistemi di
image guided

*Radioterapia
Convenzionale*



*Radioterapia
conformazionale
3DCRT*

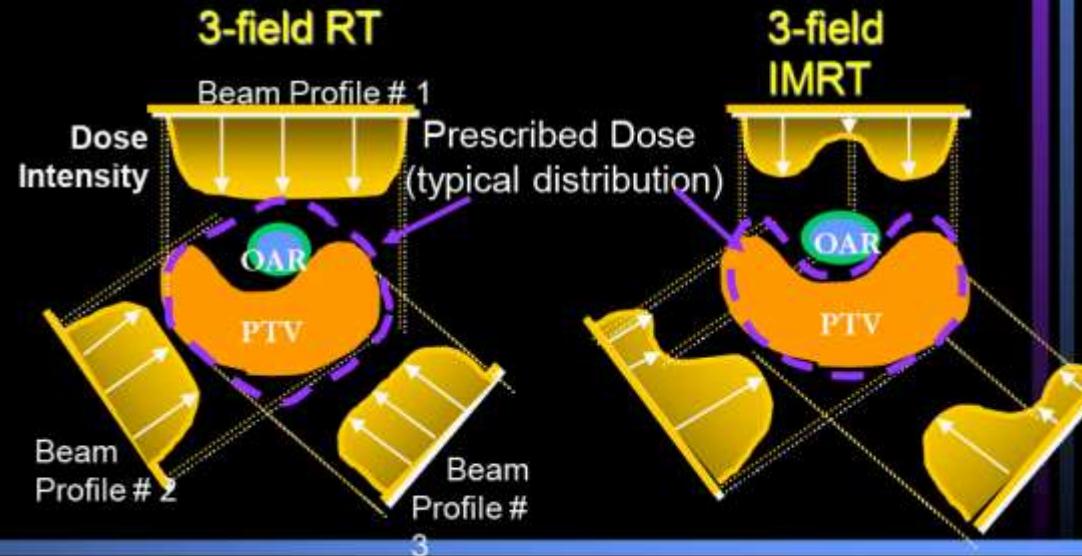
*Radioterapia a
intensità modulata
(IMRT)*



IMRT

- **IMRT:** tecnica di irradiazione conformazionale in cui l'intensità del fascio viene variata durante il trattamento
- **Perché IMRT?**
- Migliore conformazione della distribuzione di dose: creazione di isodosi concave e convesse o di aree di bassa dose circondate da regioni ad alta dose
- Riduzione dose agli OAR, pur mantenendo una buona copertura del volume bersaglio
- Migliore uniformità di dose in specifiche geometrie
- Erogazione di distribuzioni di dose disomogenee; tecniche di boost concomitante

3D-CRT vs. IMRT



Tomotherapy HI-Art System **(Highly integrated adaptive radiotherapy)**

UN PO' DI STORIA....

- Primo MVCT scan uomo : primavera 2002
- Primo trattamento: Agosto 2002
- Unità di Tomoterapia nel mondo:



110 USA&ASIA

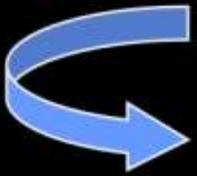
**23 EUROPA(Belgio, Francia
Olanda, Spagna, Germania,
UK,Svizzera)**

ITALIA

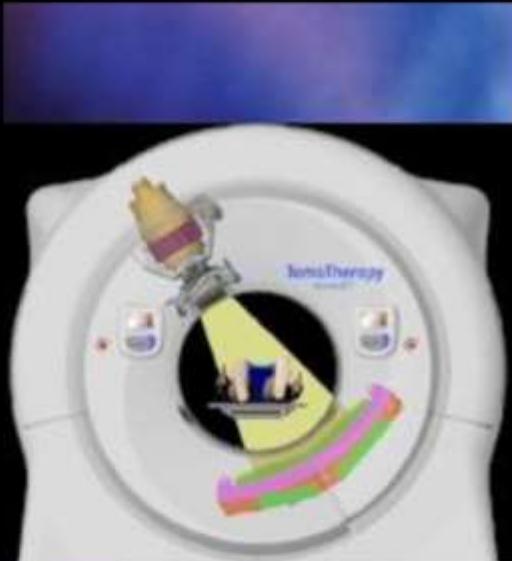
(Milano:Settembre2004-
Aprile2007;
Aviano:Febbraio2006; Meldola:
Luglio 2007; Reggio Emilia:
Settembre 2008; Modena 2009,
Roma 2009, Aosta 2010 Napoli,
Genova, Ancona, Firenze,
ecc...)

POTENZIALITA' INNOVATIVE DEL SISTEMA

❖ Erogazione di un fascio di radiazione elicoidale



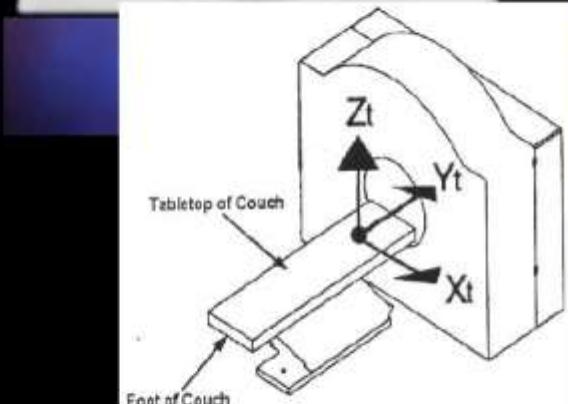
Simultanea rotazione del gantry e traslazione del lettino attraverso il bore



❖ Modulazione in intensità IMRT

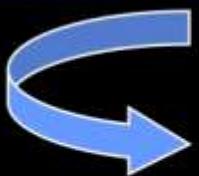


Sistema di collimazione multilamellare binario



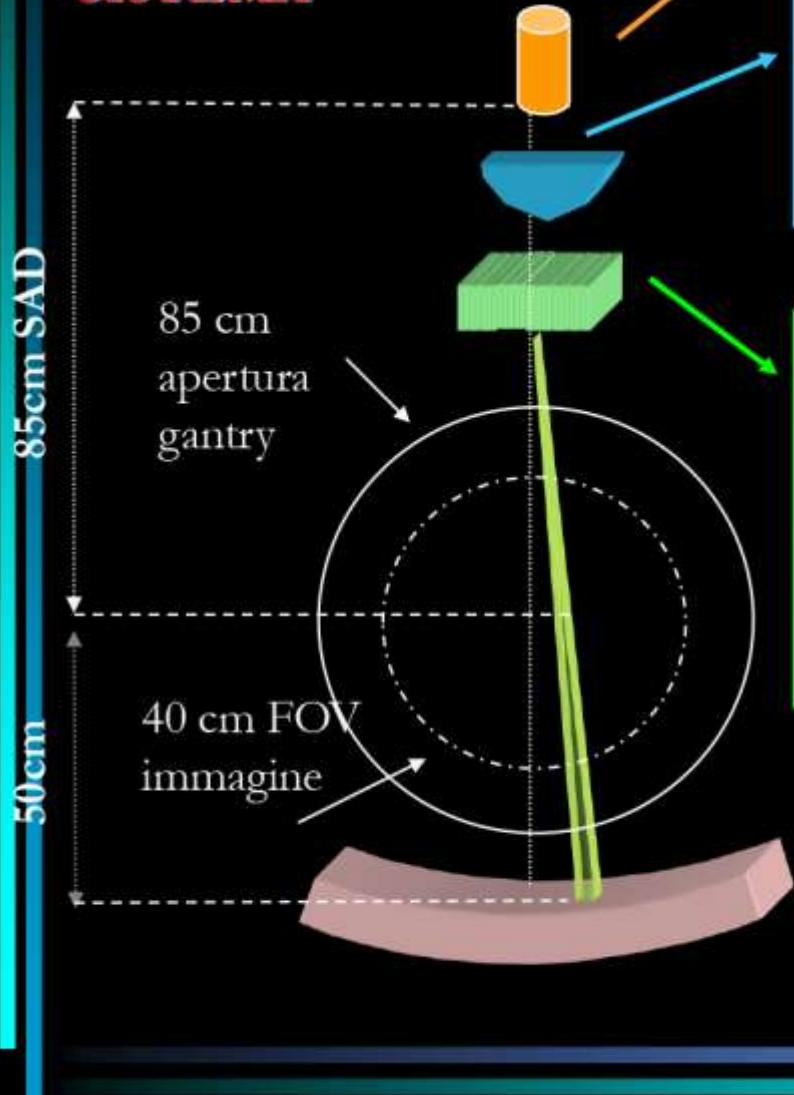
IEC Coordinate System

❖ Sistema integrato di Image Guided



Array di rivelatori CT

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA E DOSIMETRICA DEL SISTEMA



Radiation Source 6MV (800MU/min)

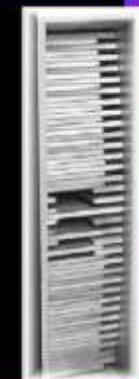
Trattamento: X= 6 MV ($E_{med}=1.5$ MeV)

Imaging: X= 3.5 MeV ($E_{med}=1$ MeV)

Collimatori mobili (tungsteno): definiscono il campo nella direzione longitudinale
- Field width: 0.5-5cm;
Max. Field: 40 cm(x) x 5cm(y)

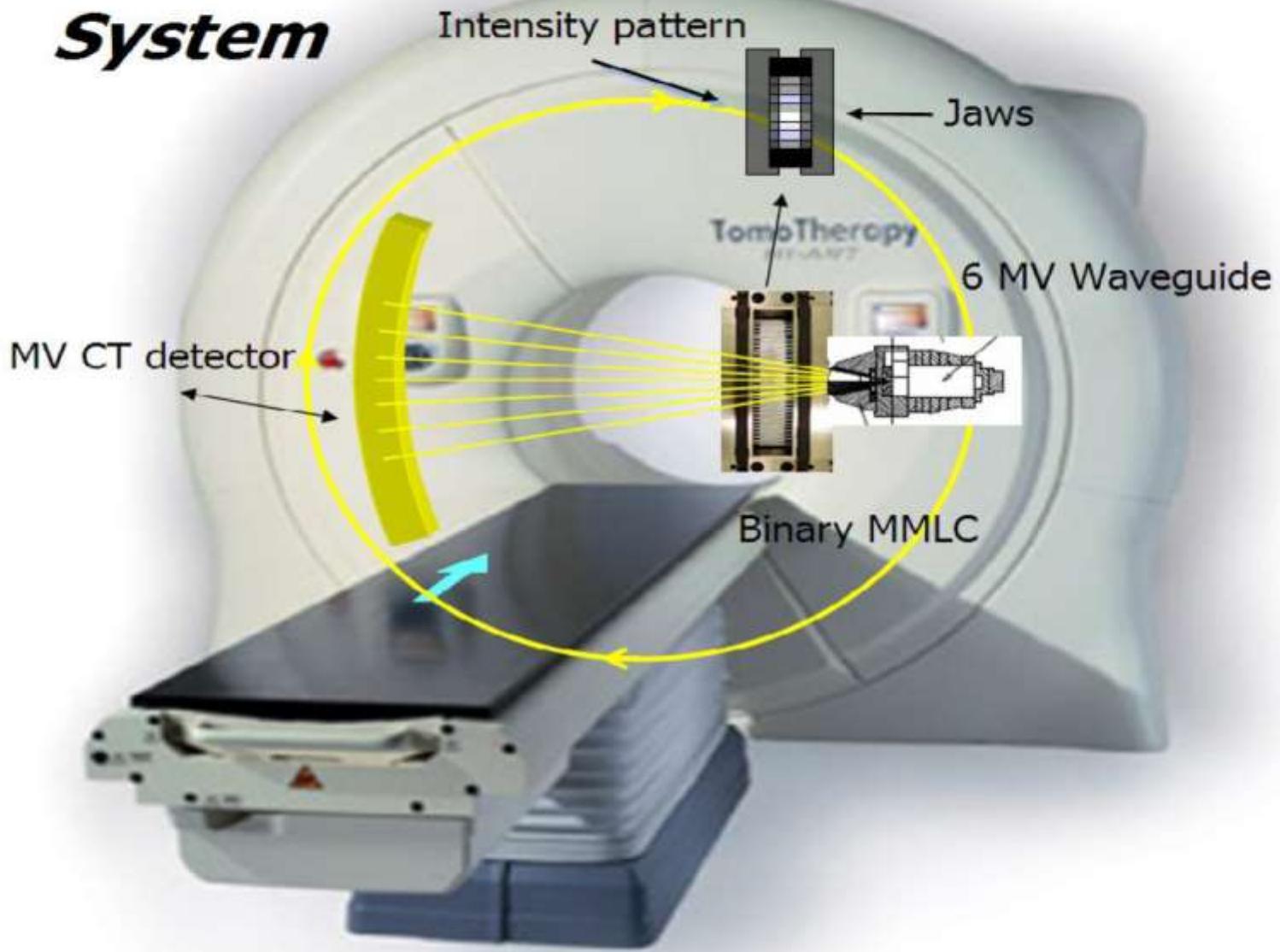
MLC binario : collima il fascio nella direzione trasversale (x)

- Lamelle binarie: on or off (time < 25 msec)
- Disegno tongue-groove
- 64 leaves (larghezza 6.25mm)
- 10 cm spessore



Array CT detector: 738 rivelatori a xenon detectors posizionati sull'anello rotante, opposti alla sorgente.

Hi-ART System

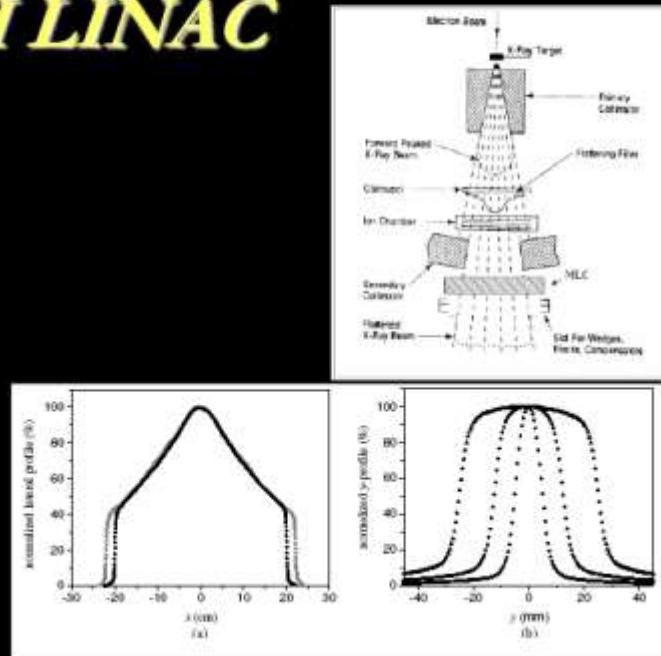


ELEMENTI DI DIFFERENZIAZIONE DELLA TOMOTERAPIA ELICOIDALE RISPETTO GLI ALTRI LINAC

➤ ASSENZA DEL FLATTENING FILTER



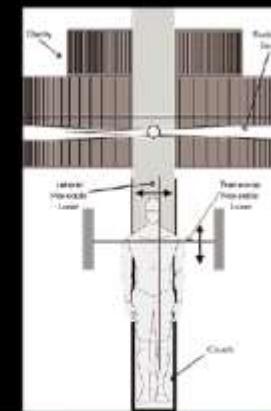
- Non uniformità dell'intensità del fascio nel piano XY
- DOSE RATE più elevati per ridurre i tempi di trattamento
- Maggiore intensità delle componenti di bassa energia dello spettro X



➤ SINCRONIZZAZIONE DELLA ROTAZIONE DELLA SORGENTE E DEL MOVIMENTO DI AVANZAMENTO DEL LETTINO



I “Quality Assurance” devono prevedere controlli addizionali e particolari rispetto al Linac

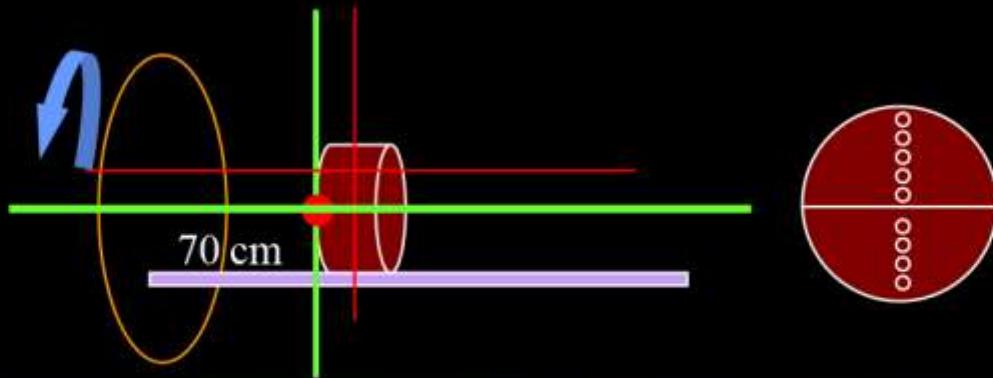


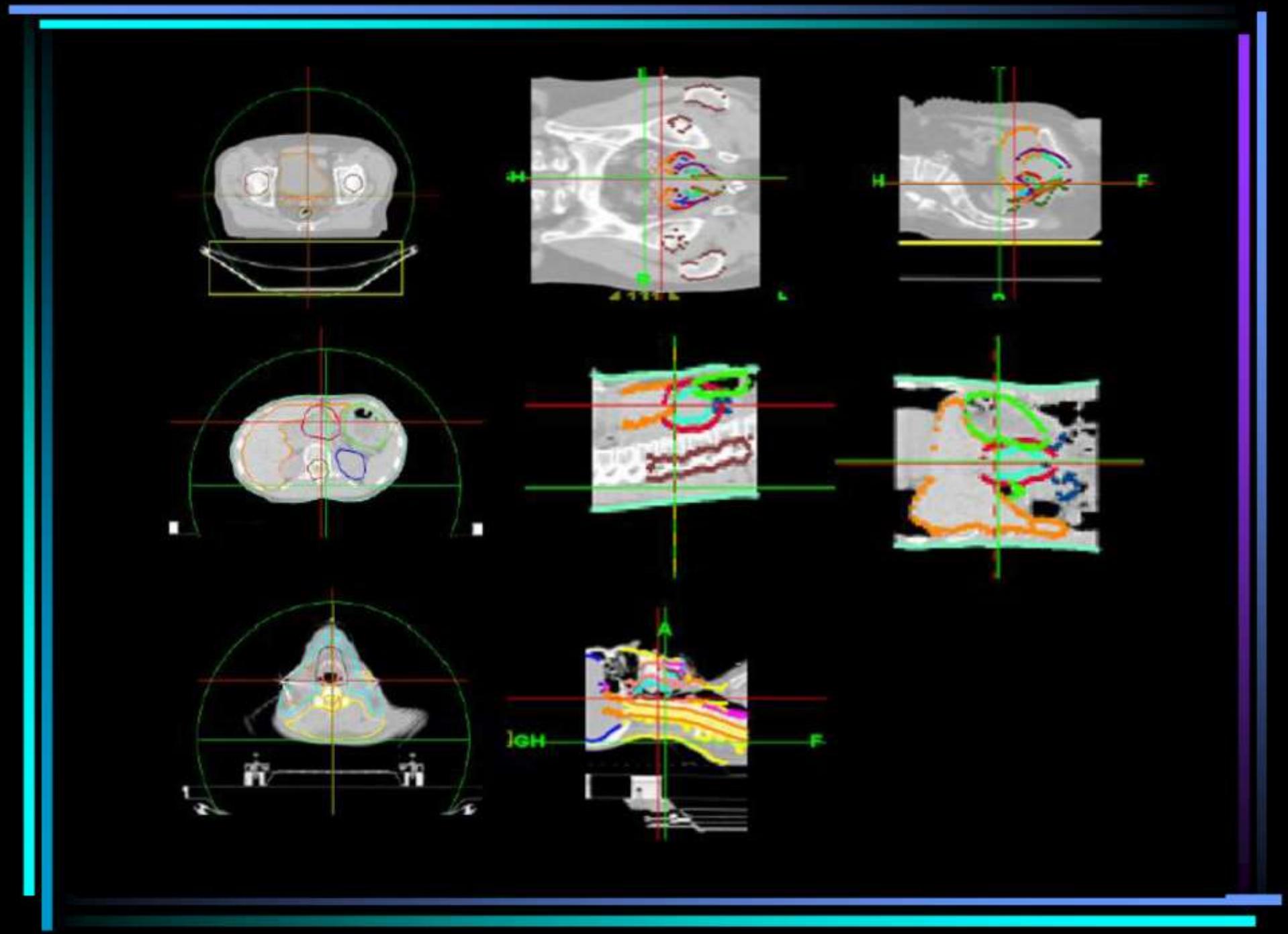
SISTEMA DI ALLINEAMENTO LASER

Il sistema è dotati di laser fissi e laser mobili.

LASER FISSI: sono i laser che definiscono l'Isocentro Virtuale della macchina, posizionato a 70 cm dall'Isocentro Radiante. Sono 2: uno sul soffitto che definisce la posizione cranio-caudale (overhead) e uno dietro la macchina che definisce la posizione laterale e l'altezza (bore).

LASER MOBILI: sono 5 laser che permettono il posizionamento del paziente; la posizione dei laser rossi rispetto ai laser verdi è dipendente dal paziente e dal piano di trattamento.





Slides courtesy of H. S. Gerardo Monza

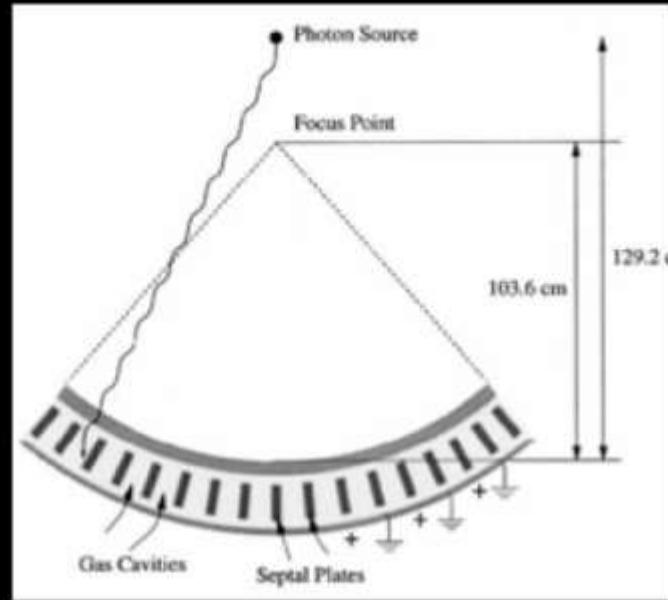
MVCT SCAN: CARATTERISTICHE TECNICHE

- **Energia:** 3.5 MV ($E_{\text{media}}=1 \text{ MeV}$)
- **Rivelatori CT :** Rivelatori a xenon disposti ad arco,
738 canali (1.21 mm centro-centro; 0.73 mm all'isocentro)
FOV=40 cm (limite imposto dalla larghezza del MLC a 540 canali centrali)
- Distanza Sogente-Array CT~142 cm
- **Periodo di rotazione:** 10 sec.
- 2 slice ricostruzione per rotazione
- **Modalità di acquisizione :** Fine/ Normal/ Course;
(2, 4, 6 mm)



MVCT SCAN: CARATTERISTICHE TECNICHE

- **Matrice ricostruzione immagine:** 512 x 512 (0.78 mm in-plane resolution)
- **Tempo ricostruzione:** ~ 1sec per slice, contemporanea all'acquisizione dei dati
- **Dose media :** ~ 2 cGy Fine Scan;
~ 1.2-1.5cGy Normal Scan;
<1cGy Course Scan
- **Tempi tipici:** ~ 5 minuti (Acquisizione, Ricostruzione, Registrazione)



MVCT SCAN: QUALITA' D'IMMAGINE

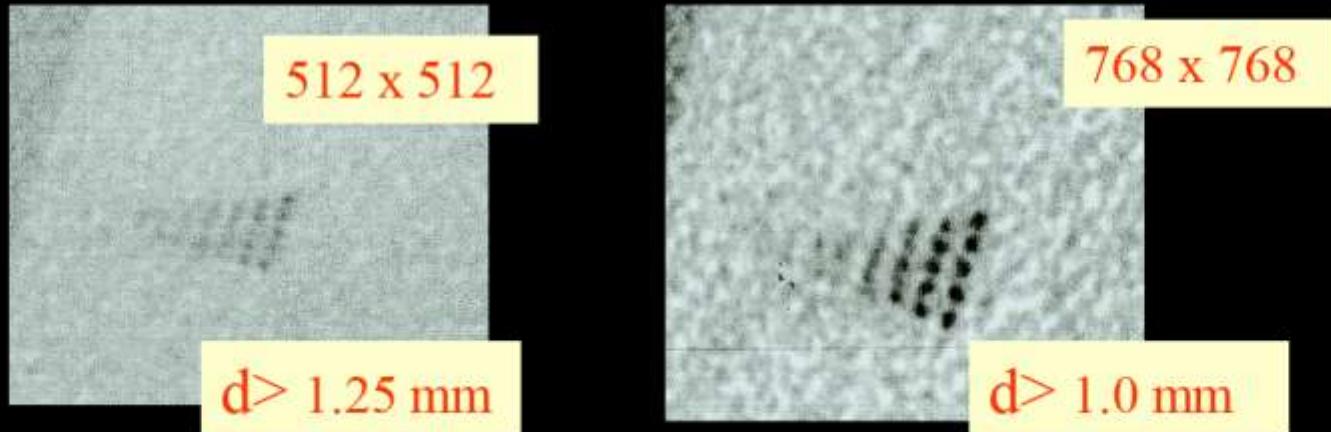
(S.L. Meeks, Med. Phys. 2005)

Uniformità immagine: Indice di Uniformità ~99.5% comparabile con valori di immagini KVCT; uniformità indipendente sia dal pitch utilizzato che dalla matrice di risoluzione

Rumore: ~ 2% - 4%; rumore MVCT scan leggermente superiore a quello di immagini KVCT

Risoluzione spaziale: quasi comparabile con quella di immagini KVCT

Risoluzione di contrasto: 3% per un oggetto di 3cm



MVCT SCAN: TECNICHE DI REGISTRAZIONE

- Matching (kV, MV) **automatico** e **manuale**
- Matching su visioni assiali, coronali e sagittali
- **6 possibili correzioni:**

3 translazioni (x, y, z)

3 rotazioni intorno a questi tre assi (pitch, yaw, roll)

Pitch, yaw → movimento paziente ;

Roll → correzione automatica

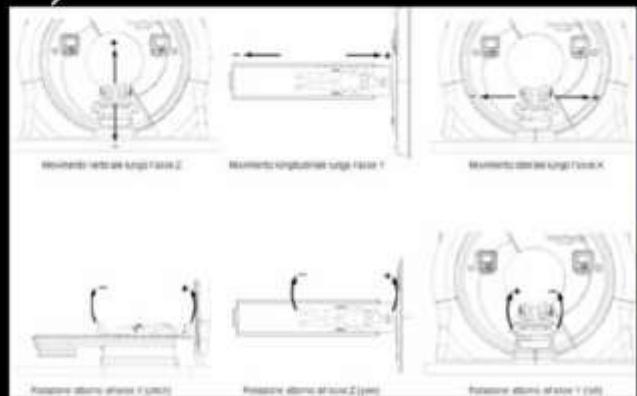
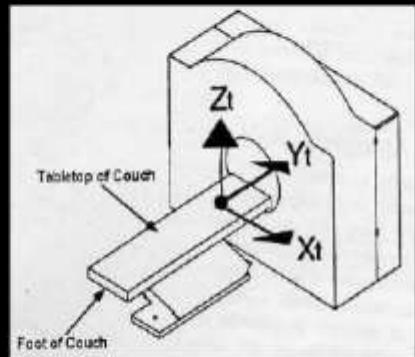
(modificando l'angolo di partenza del gantry)

x Direction >>> Movimento lettino manuale

y and z direction>>> Movimenti lettino automatici

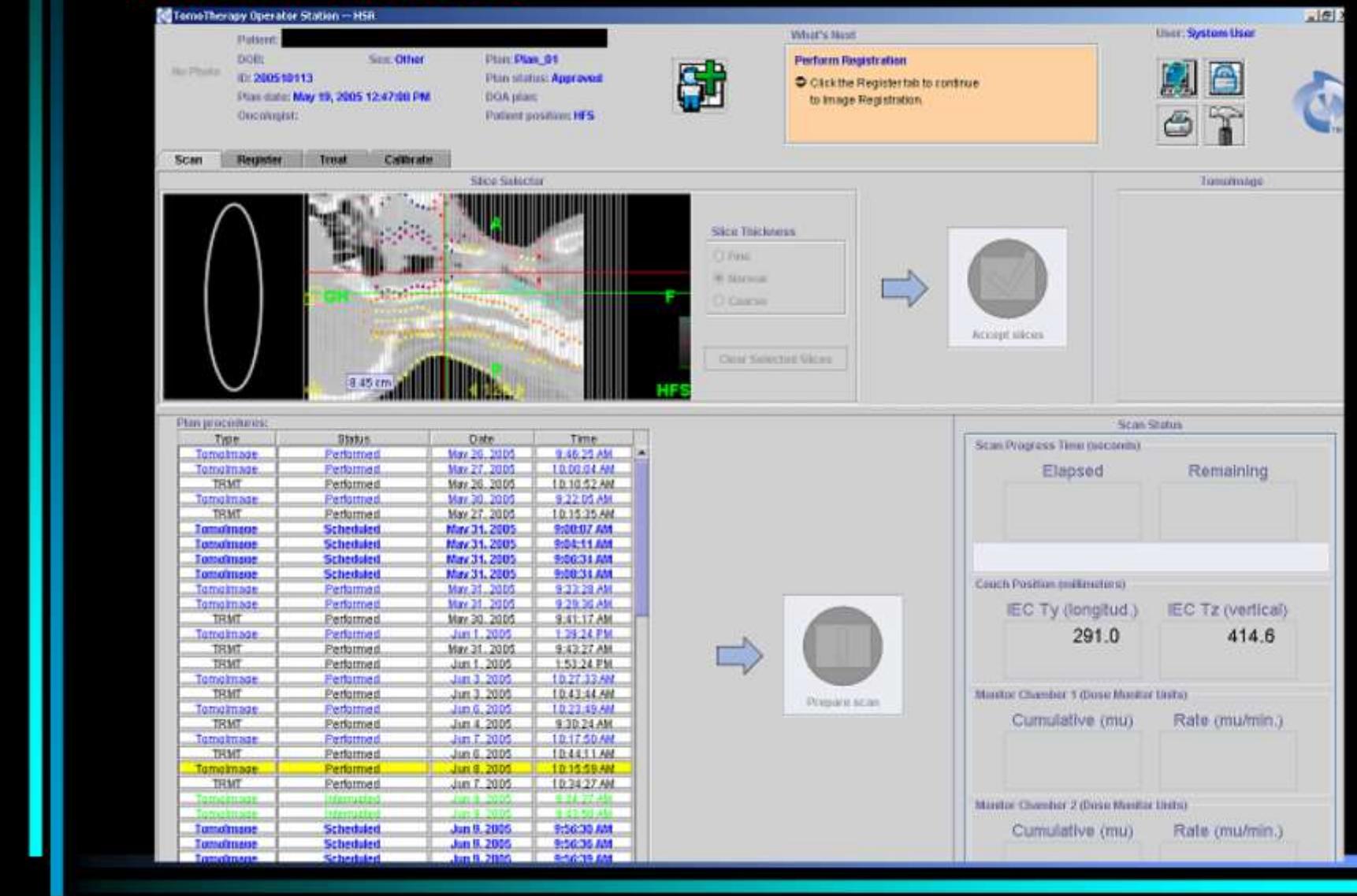
- movimenti verticali e longitudinali avvengono contemporaneamente

- Il lettino presenta un effetto di abbassamento, quando si sposta longitudinalmente



MVCT SCAN: TECNICHE DI REGISTRAZIONE

SELECTION PANEL

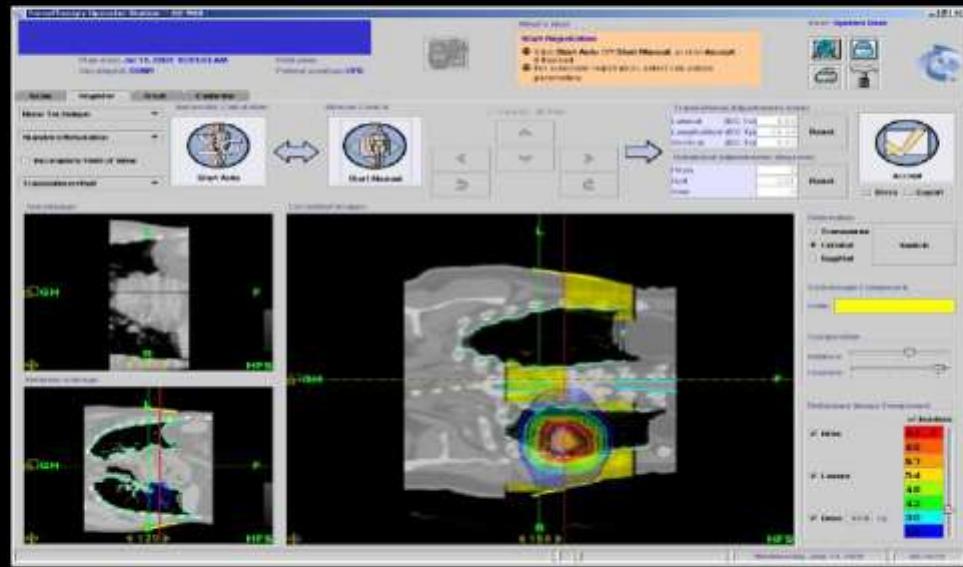


MVCT SCAN: TECNICHE DI REGISTRAZIONE

REGISTRATION PANEL



MVCT IMAGING



- Fascio per imaging uguale a quello di trattamento (si evitano problemi di allineamento)
- Visualizzazione tessuti molli: non sono richiesti surrogati
- Imaging volumetrico 3D
- Registrazione MVCT-CT, informazioni simili
- Registrazione sia dell'anatomia che della distribuzione di dose

MVCT IMAGING: POTENZIALITA'

- ✓ Imaging per localizzazione target .



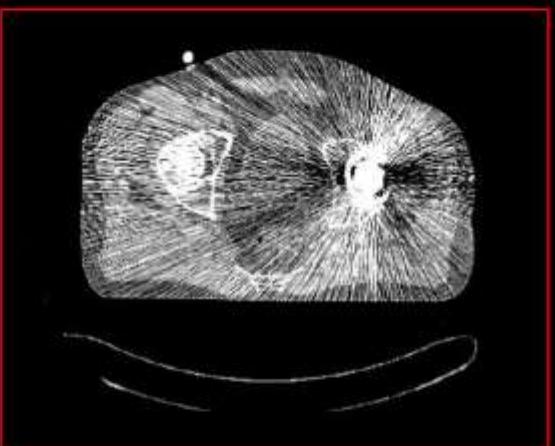
Allineamento paziente e correzione posizionamento

- ✓ Imaging per simulazione (presenza di protesi, riduzione artefatti).
- ✓ Adaptive radiotherapy: riduzione/ variazione volumi trattamento.
- ✓ Dosimetria in-vivo grazie a misure di trasmissione.

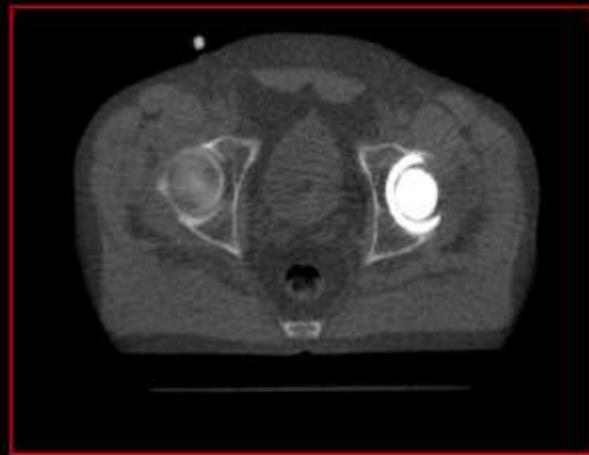


Misura di dose in uscita e ricostruzione della
dose effettivamente impartita al paziente

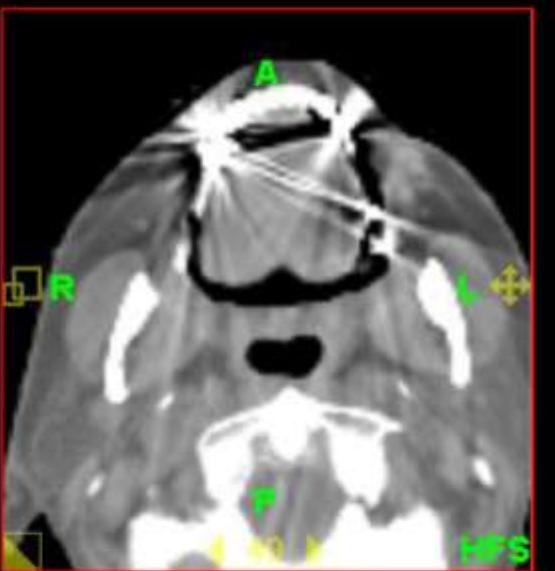
MVCT: MATERIALI ALTO Z



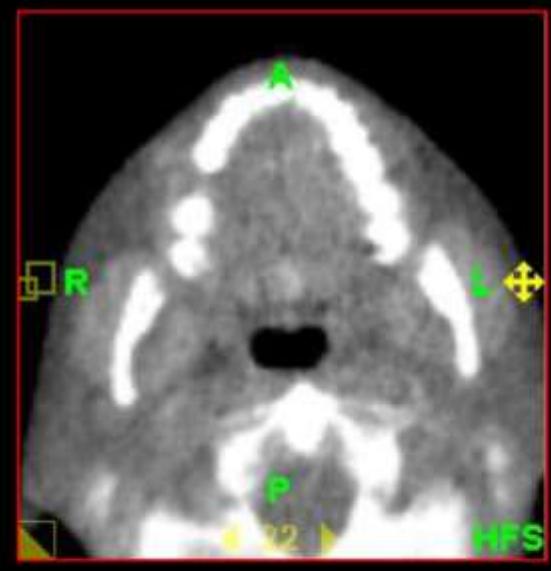
Protesi : KVCT



Protesi : MVCT



Artefatti dentali : KVCT



Artefatti dentali : MVCT

QUALITY ASSURANCE

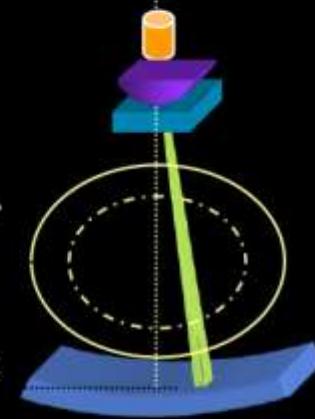
- Protocolli QA per Linac convenzionali riadattati all'unità di Tomoterapia
- Protocolli QA Tomoterapia devono riflettere le specifiche peculiarità dell' unità (sistema dedicato all'irradiazione IMRT; forma a cono, lettino in movimento, continua irradiazione,...)
- Frequenza e tipi di controlli in evoluzione

COMMISSIONING & acceptance testing procedure ATP

♦ CARATTERIZZAZIONE MECCANICA/GEOMETRICA

[Balog, Med.Phys.2003]

- Allineamento sistema laser (laser fissi isocentro radiazione; laser mobili di posizionamento)
- Allineamento componenti sistema: sorgente, collimatori mobili, MLC, array CT, piano rotazione isocentro
- Verifica accuratezza posizionamento lettino



→ Film, array CT

♦ CARATTERIZZAZIONE DOSIMETRICA

[Balog, Med.Phys.2003]

- Verifica profili trasversali/longitudinali e PDD per i possibili campi
- Misura fattori di output MLC per le diverse combinazioni di apertura e chiusura delle lamelle
- Misure curve di latenza MLC

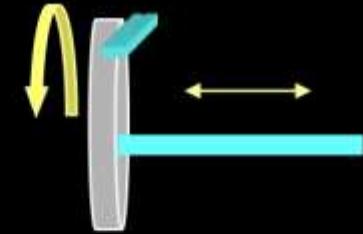
→ Fantoccio acqua, array CT

COMMISSIONING & ATP

♦ CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

[Balog, *Med.Phys.2006*];[Fenwick, *Med.Phys.2004*]

- Accuratezza e costanza della velocità di movimento del lettino;
- Accuratezza e riproducibilità di posizionamento delle lamelle;
- Misura tempi di latenza delle lamelle;
- Sincronizzazione angolo gantry e movimento lamelle;
- Sincronizzazione movimento gantry- movimento lettino;
- Sincronizzazione angolo gantry –impulso linac



→ Film

♦ CARATTERIZZAZIONE QUALITA' IMMAGINE

[Ruchala,, *Phys. Med. Biol. 1999*]

- Uniformità, risoluzione, contrasto, dose

Accuratezza dosimetrica piano IMRT: confronto tra distribuzione di dose calcolata e misurata

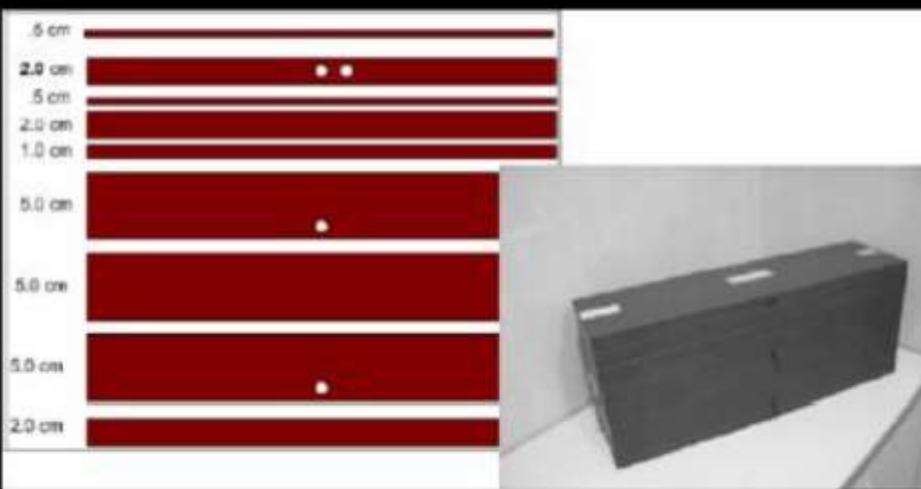


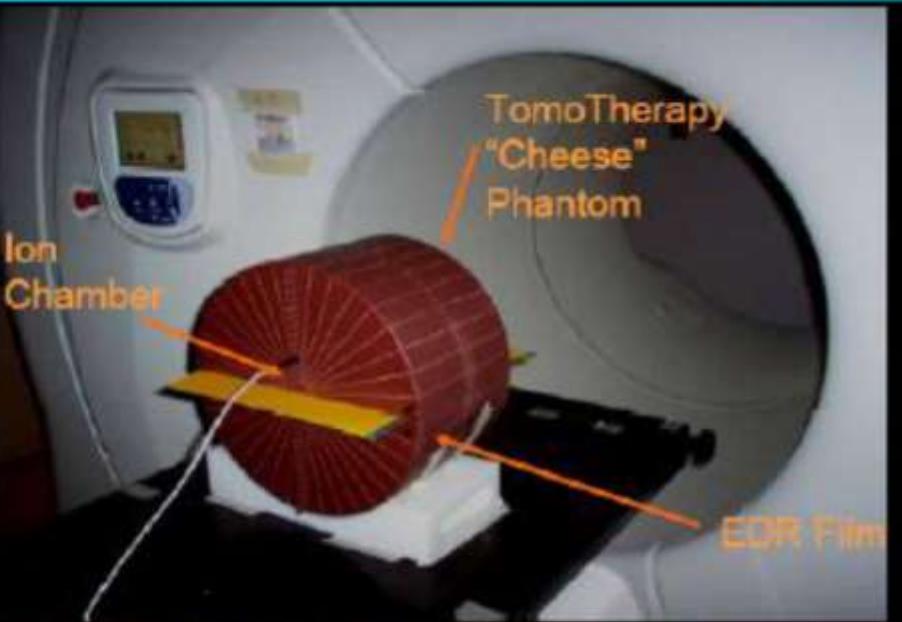
WATER PHANTOM

MODEL A1SL
EXRADIN MINIATURE SHONKA
THIMBLE CHAMBER



SLAB PHANTOM

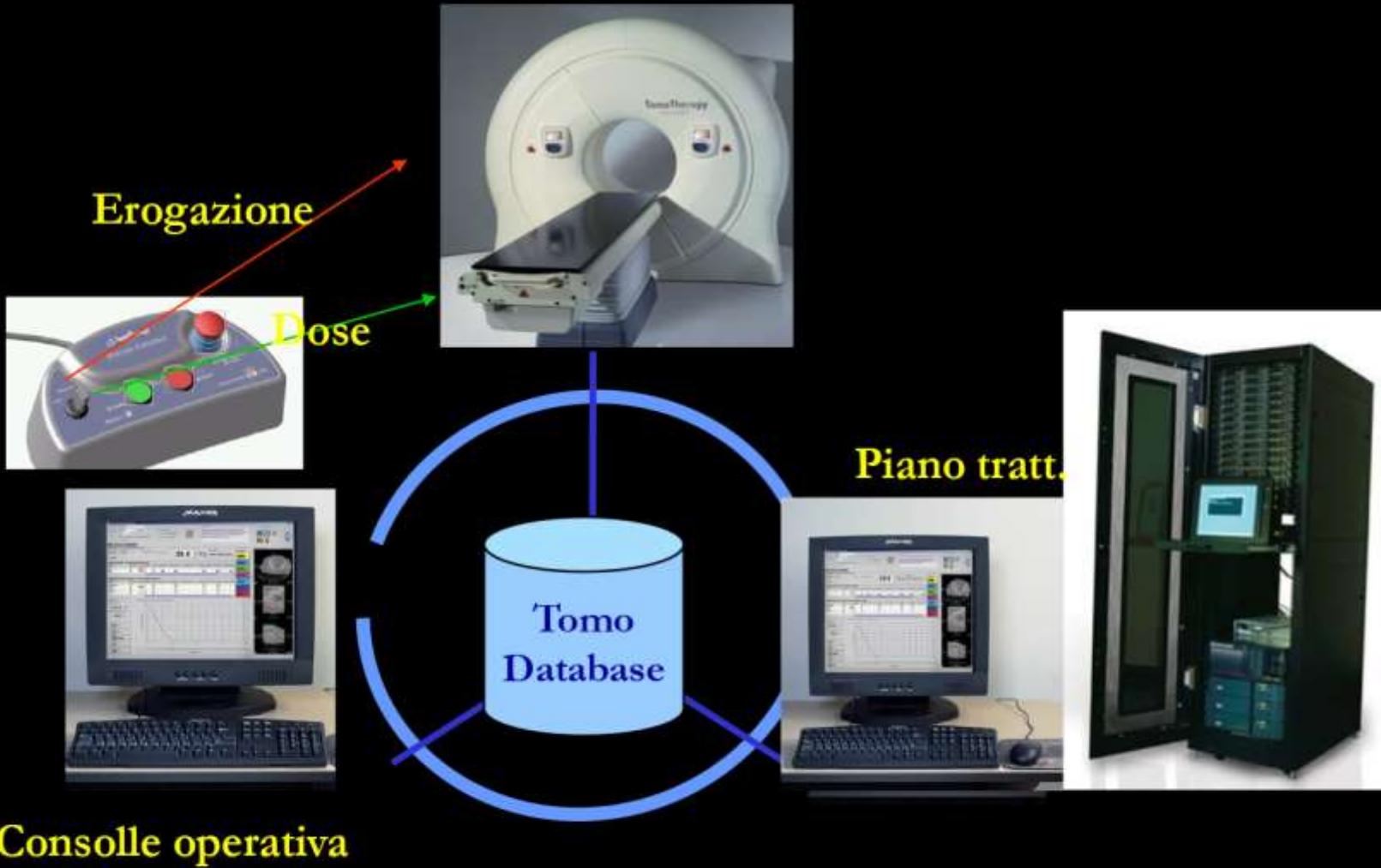




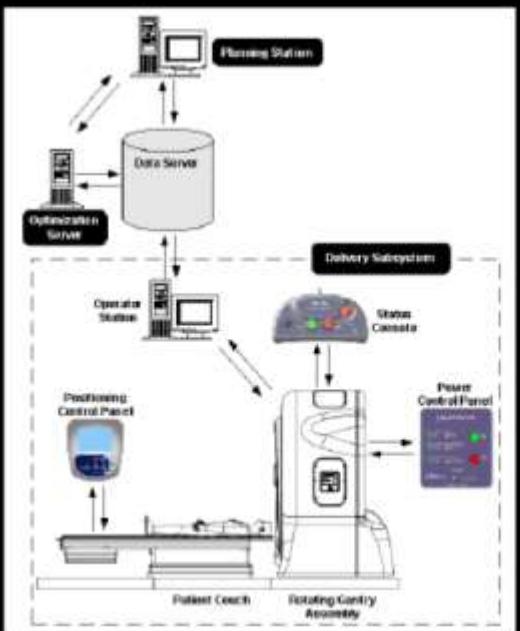
CHEESE PHANTOM



IL SISTEMA INTEGRATO Hi - ART (Highly Integrated Adaptive Radiotherapy)



WORK-FLOW



CT or PET/CT

(MRI encefalo + selezionati
pz testa-collo e prostata)

**Contornamento e
trasferimento alla Tomo
WS**

Pianificazione

**(Algoritmo di calcolo
“CONVOLUTION/SUP
ERPOSITION”)**

Dosimetria e QA

**MV-CT e
trattamento**

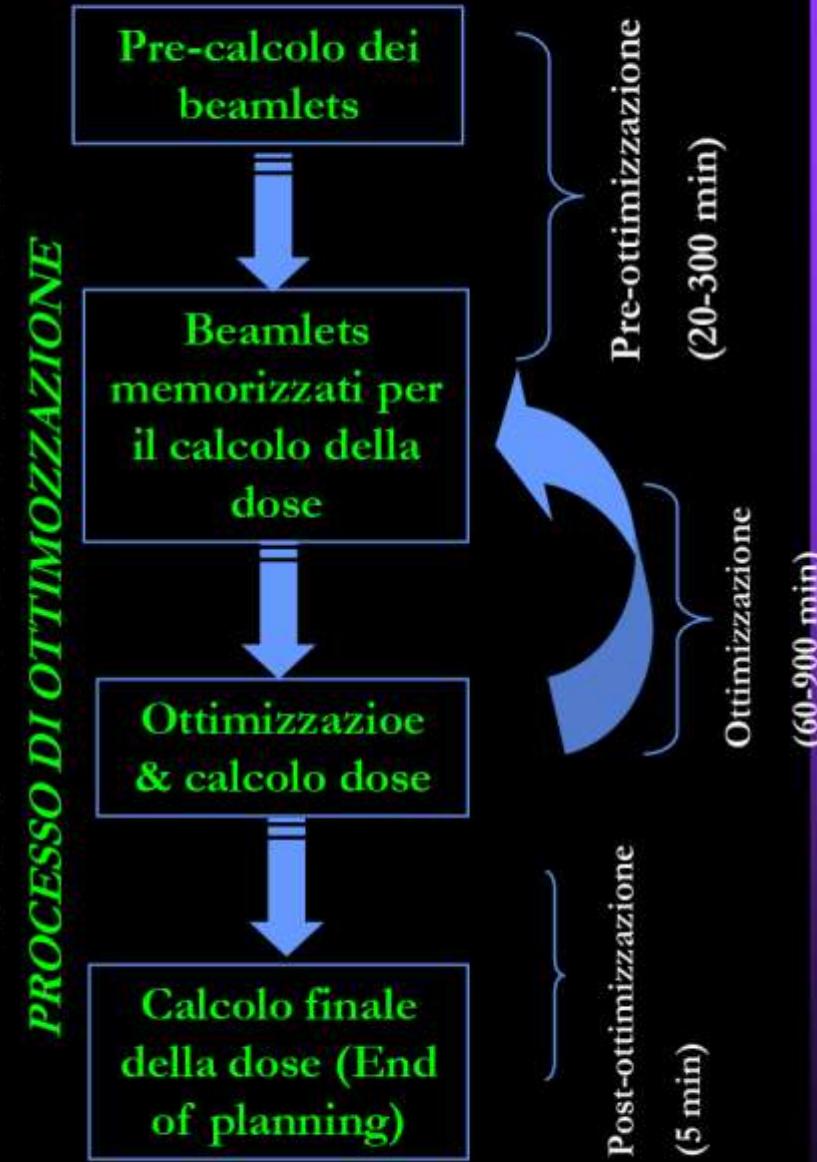
PIANIFICAZIONE

Il sistema di pianificazione dedicato consente il calcolo della dose in tre passaggi:

- **Fase di precalcolo**, in cui vengono elaborati i calcoli di base che descrivono i beamlets per le 51 possibili proiezioni nella rotazione del gantry definiti solo sulla forma del volume bersaglio e la loro interazione con il paziente; questo può essere fatto in automatico senza l'intervento dell'operatore.
- **Fase di ottimizzazione**, che viene effettuata mediante Inverse Planning soddisfacendo i constraints impostati dall'operatore.
- **Fase di calcolo della distribuzione di dose**, che tiene conto del tempo reale di apertura e chiusura delle lamelle del MLC e del tempo di latenza di queste ultime

INVERSE PLANNING

- L'ottimizzazione del piano di trattamento viene posto come **Problema Inverso**:
 - partendo da una distribuzione di dose considerata “ottimale” e clinicamente efficace, vengono determinati i parametri di trattamento che forniscono tale distribuzione di dose nel paziente.
- **Intensità Modulata** : equivale a trovare la migliore configurazione dei fasci e il loro relativo profilo di intensità di fluenza.



PIANIFICAZIONE

Parametri selezionabili dall'utilizzatore:

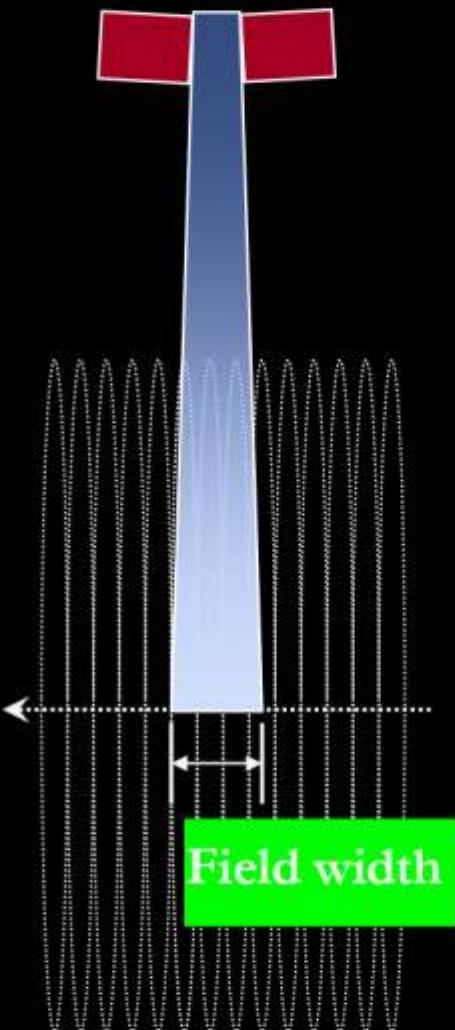
- Larghezza di campo
- Fattore di modulazione
- Pitch

Angolazioni gantry: il gantry ruota continuamente per 360°, si creano quindi 51 possibili proiezioni per rivoluzione (51 diverse configurazioni dei campi), il che significa che l'eventuale configurazione del MLC viene modificata ogni 7.06°. E' possibile evitare alcune angolazioni “Bloccando” il fascio di radiazione in corrispondenza delle corrispondenti strutture anatomiche nella fase di ottimizzazione.

Velocità di rotazione del gantry (costante durante tutto il singolo trattamento) e *tempo di trattamento* dipendono dai parametri selezionabili dall'utente, dalla dose di prescrizione, dalla lunghezza del target e dal dose rate della macchina.

Periodo di rotazione trattamento : 15-60 sec

FIELD WIDTH



Dimensione del fascio all'isocentro
lungo la direzione longitudinale, y
(direzione sup-inferiore).

Rappresenta lo spessore del fascio
rotante.

Field width possibili: 1cm, 2.5 cm; 5 cm

PITCH

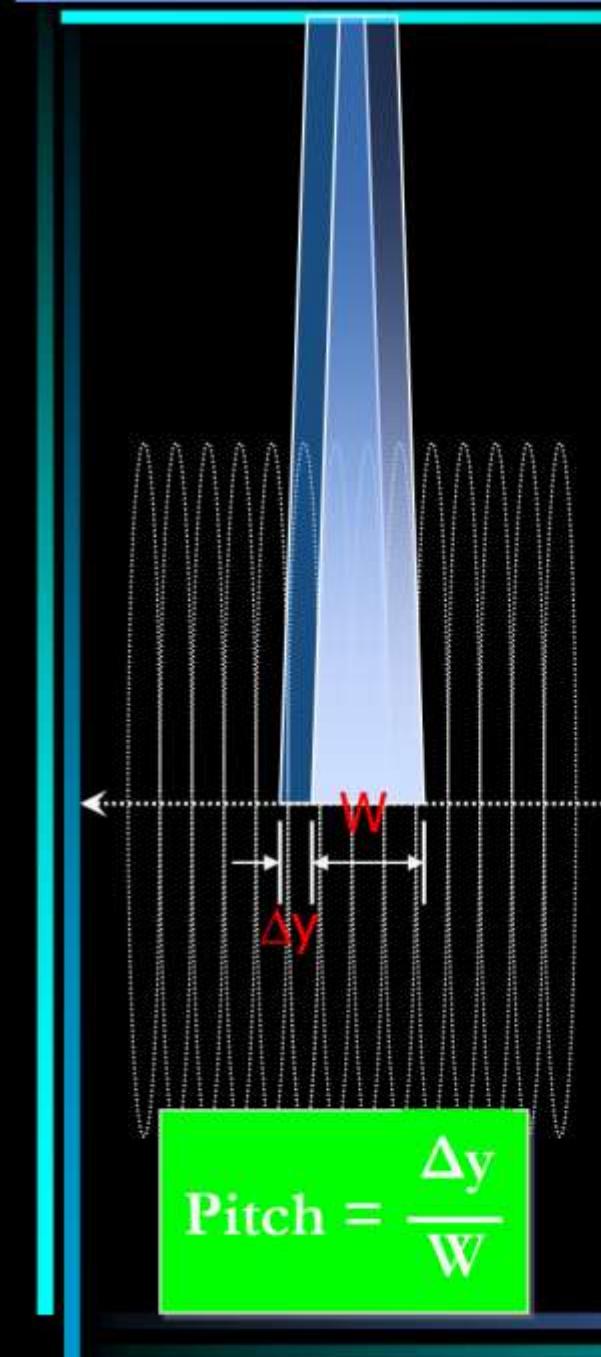
Frazione della larghezza del campo che il fascio elicoidale percorre, nella direzione longitudinale (in y), in una singola rotazione

PER ESEMPIO...

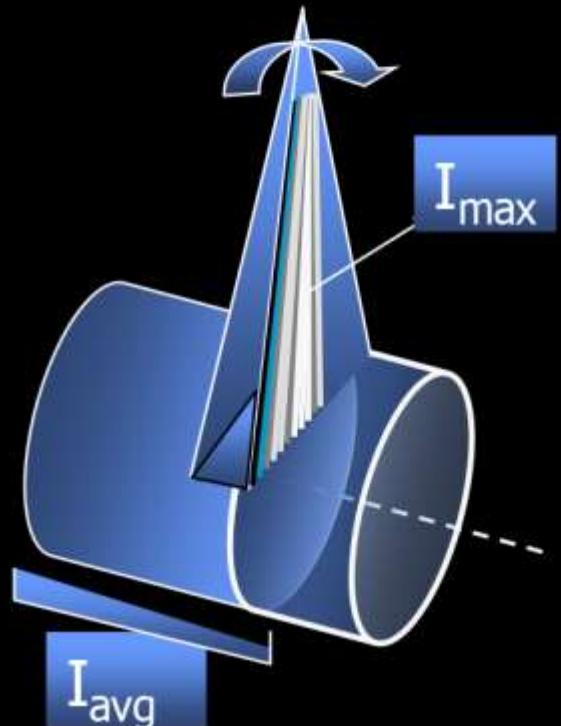
Pitch=1; FieldSize=1cm significa che il lettino si sposta di 1cm per ogni singola rotazione (Loose pitch)

Pitch=0.3; FieldSize=2.5cm significa che il lettino si sposta di 0.75cm per ogni singola rotazione (Tight pitch)

$$\text{Pitch} = \frac{\Delta y}{W}$$



MODULATION FACTOR



Il rapporto tra l'intensità massima e l'intensità media (tra tutti i valori di intensità non-nulli), considerando tutte le proiezioni e tutti i beamlet per l'intero trattamento elicoidale.

Più grande è il valore del MF, più modulazione dell'intensità del fascio è necessaria e quindi più lento sarà il periodo di rotazione.

$$\text{Modulation Factor} = \frac{I_{\max}}{I_{\text{avg}}}$$

PARAMETRI TRATTAMENTO ELICOIDALE: EFFETTI

PARAMETRO		EFFETTO
Field Width	▲	<ul style="list-style-type: none">•Minore risoluzione di dose lungo la direzione longitudinale (inf-sup)•Più Brevi tempi trattamento
Field Width	▼	<ul style="list-style-type: none">•Maggiore risoluzione di dose lungo la direzione longitudinale (inf-sup)•Più lunghi tempi trattamento
Pitch	▲	<ul style="list-style-type: none">•Minore risoluzione di dose lungo la direzione longitudinale (inf-sup)•Più Brevi tempi trattamento (Loose helix; lettino più veloce)
Picth	▼	<ul style="list-style-type: none">•Maggiore risoluzione di dose lungo la direzione longitudinale (inf-sup)•Più lunghi tempi trattamento (Tighter helix; lettino più lento)
MF	▲	<ul style="list-style-type: none">•Maggiore risoluzione di dose nel piano assiale•Più lunghi tempi trattamento (Velocità di rotazione più lenta)
MF	▼	<ul style="list-style-type: none">•Minore risoluzione di dose nel piano assiale•Più Brevi tempi trattamento (Velocità di rotazione più veloce)

Prescrizione Dose

The screenshot shows a software interface for radiation therapy planning. At the top center, it displays "71.4 Gy". To the left, there's a "Prescription" section with fields for "For PTV 4", "Field Width: 2.5 cm - Isocenter: 0.0, 0.0", "Pitch: 0.300", "Dose Calc Grid: Normal", and "Batch beamlets: 0". Below this is a table titled "Tumor Constraints" with columns: Name, Display, Color, Blocked, Use?, Importance, Max Dose [Gy], Max Dose P, D VH Vol [%], D VH Dose, Min Dose [Gy], and Min Dose P. The rows include PTV 3, PTV 2, PTV 4, and Ovarian. A callout points to the "Importance" column with the text "Importanza: è associata alla struttura". Another callout points to the "Min Dose P" column with the text "Penalità: associata a ciascun constraint definito". To the right of the table, three concepts are listed: "Dose max", "Dose minima", and "Dose-volume".

Indici di copertura delle strutture Target

-Tumor Constraints-

Name	Display	Color	Blocked	Use?	Importance	Max Dose [Gy]	Max Dose P	D VH Vol [%]	D VH Dose	Min Dose [Gy]	Min Dose P
PTV 3	<input checked="" type="checkbox"/>	Red	None	<input checked="" type="checkbox"/>	100	61.6	8000	50.0	61.6	61.6	150000
PTV 2	<input checked="" type="checkbox"/>	Orange	None	<input checked="" type="checkbox"/>	100	56.0	8000	50.0	56.0	56.0	300000
PTV 4	<input checked="" type="checkbox"/>	Purple	None	<input checked="" type="checkbox"/>	100	71.4	8000	50.0	71.4	71.4	150000
Ovarian	<input checked="" type="checkbox"/>	Gold	None	<input checked="" type="checkbox"/>	100	62.5	8000	50.0	62.5	62.5	100000

Importanza: è associata alla struttura

Penalità: associata a ciascun constraint definito

Indici di risparmio OAR

-Sensitive Structure Constraints-

Name	Display	Color	Blocked	Use?	Importance	Max Dose [Gy]	Max Dose Per	D VH Vol [%]	D VH Dose [Gy]	D VH PI Pen.
Bulbo	<input checked="" type="checkbox"/>	White	None	<input checked="" type="checkbox"/>	1	50.0	100200	10.0	20.0	20
CTV 3	<input checked="" type="checkbox"/>	Light Green	Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	1	61.6	20	0.0	61.6	20
CTV 4	<input checked="" type="checkbox"/>	Dark Blue	None	<input checked="" type="checkbox"/>	1	71.4	20	0.0	71.4	20
Fanbeam	<input checked="" type="checkbox"/>	Light Green	Pink	<input checked="" type="checkbox"/>	1	80.0	1	10.0	20.0	20

Dose max.
Dose-volume

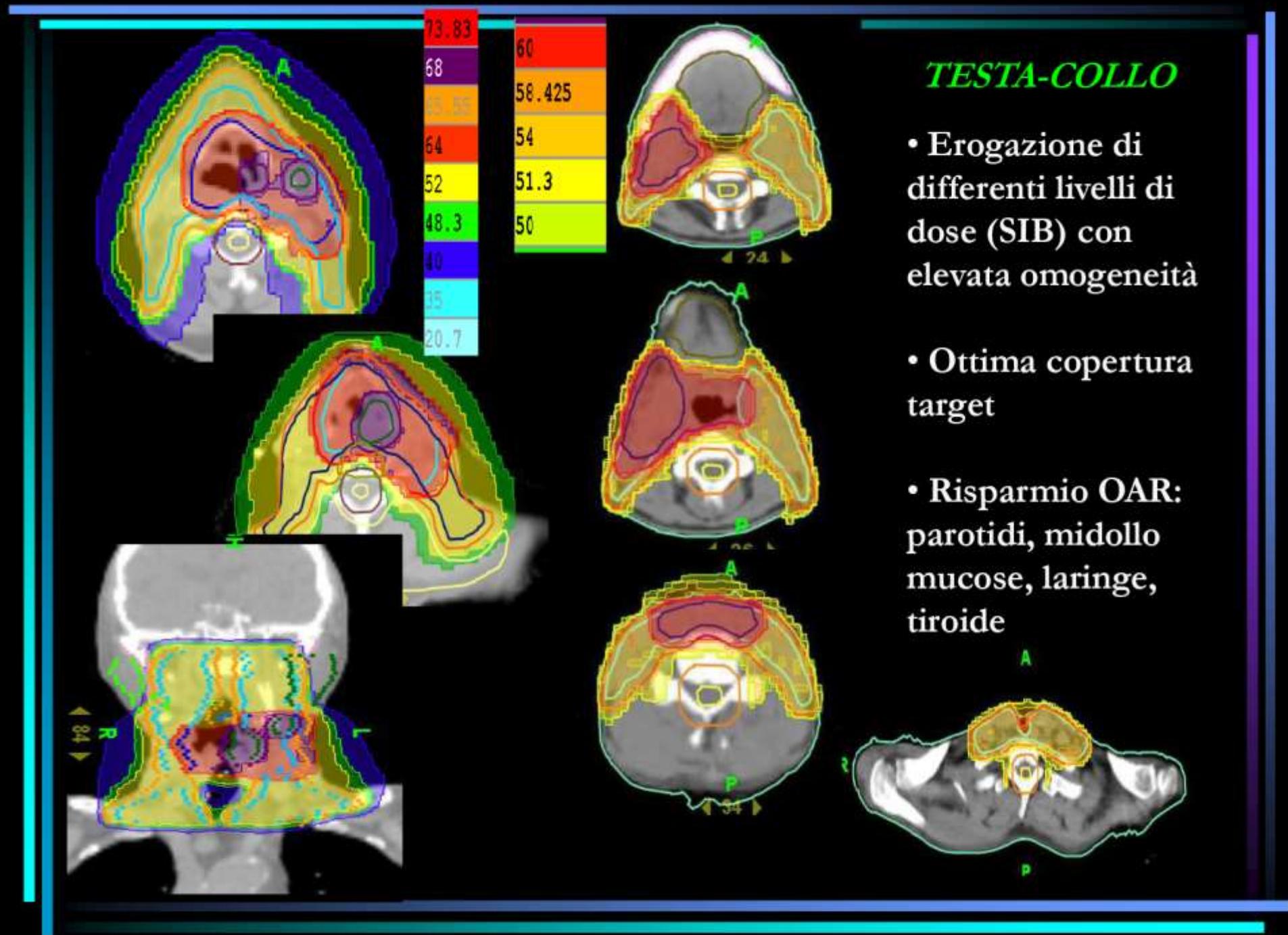
PLANNING TOMO

Vantaggi

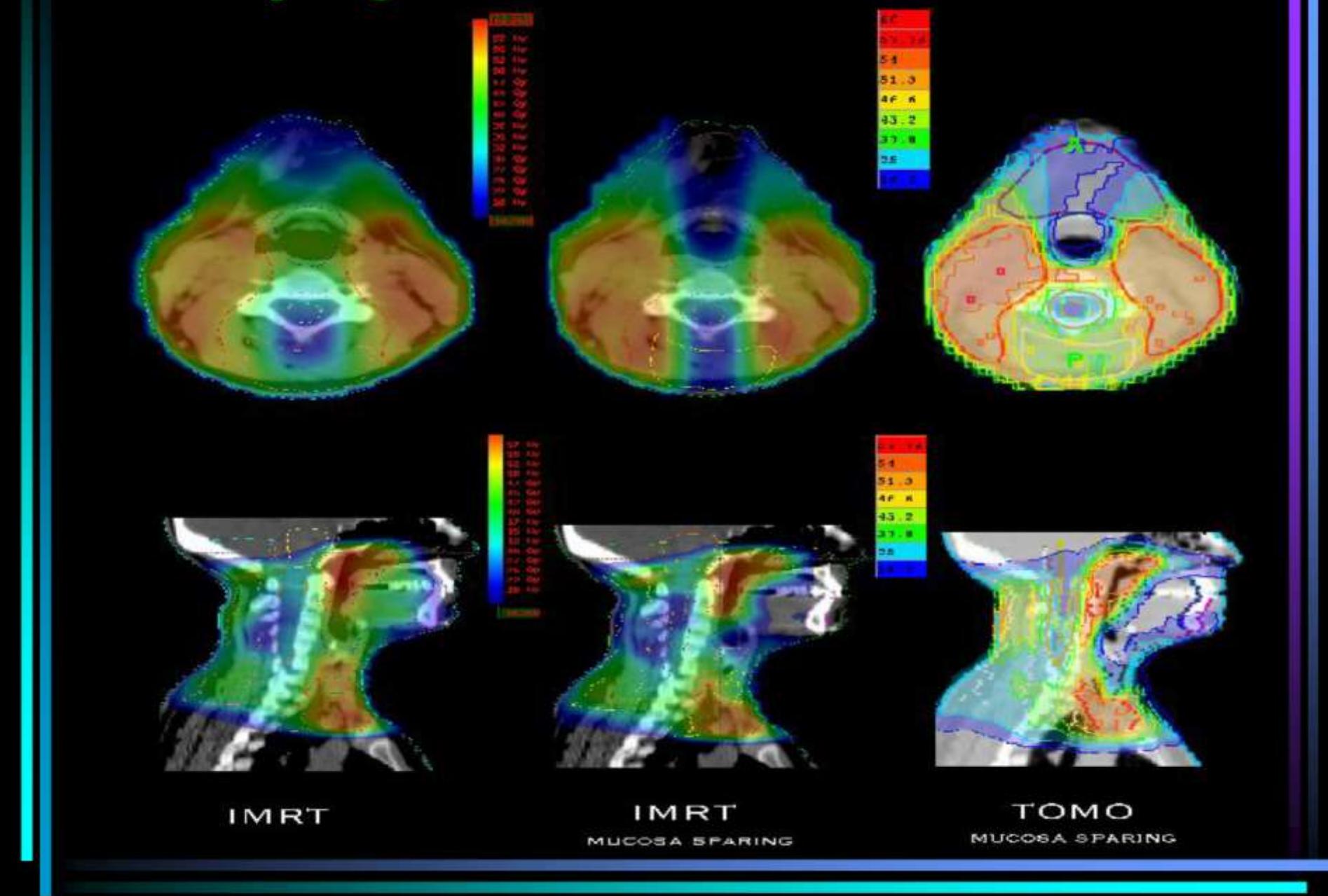
- Distribuzioni altamente conformate con gradienti di dose elevati (dose painting/dose sculpting)
- Erogazione boost concomitanti
- Irradiazione concomitante di lesioni multiple
- Problemi di giunzione campi evitati
- Adaptive planning

Svantaggi

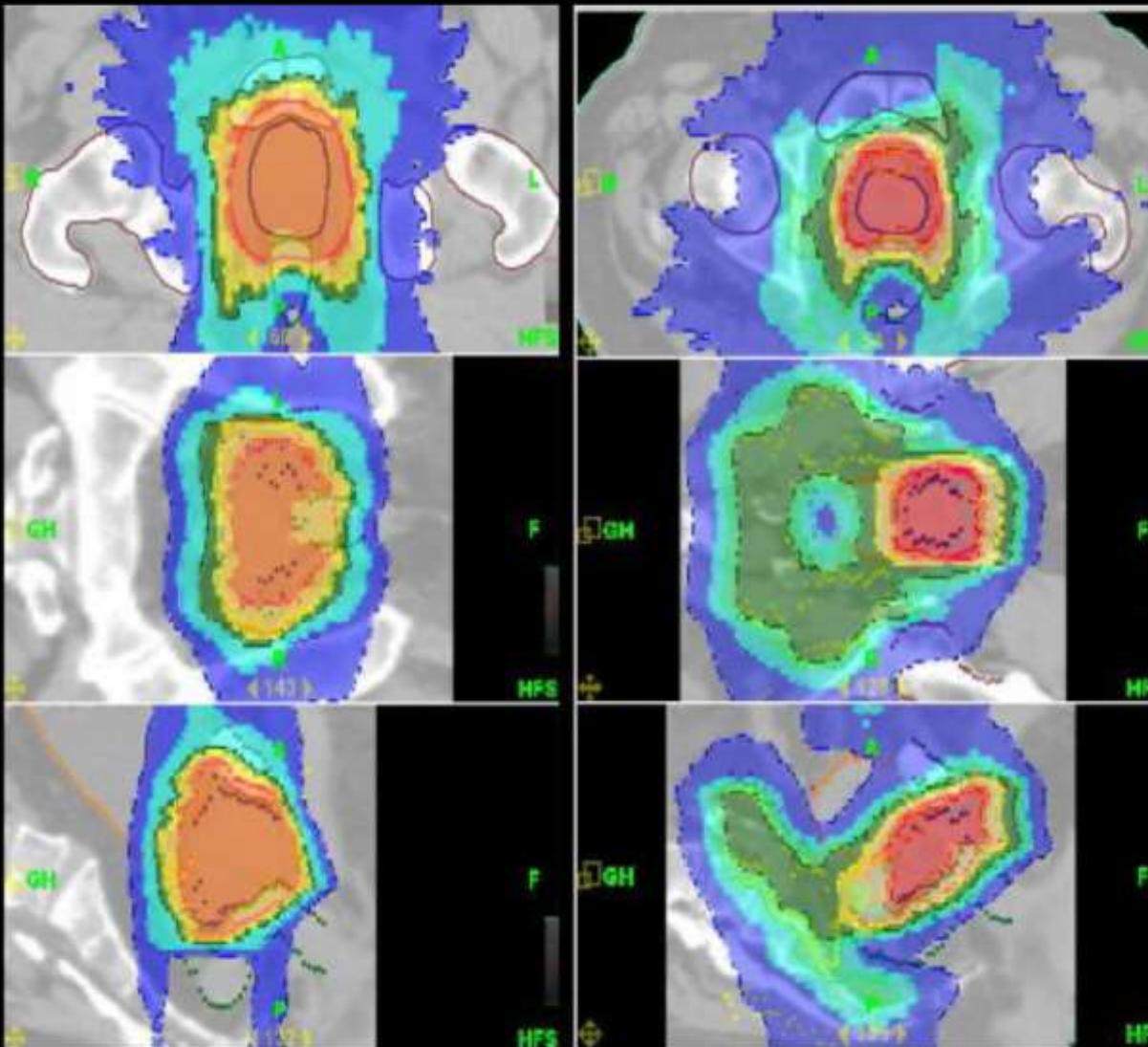
- Irradiazione altamente conforme/gradienti di dose elevati: attenzione definizione volumi
- Trattamenti non efficaci per PTV lunghi e tempi di trattamento elevati
- Gradiente di dose lungo la direzione cranio-caudale
- Dose integrale (bagno di dose delle dosi medio/basse) (è legato al numero di campi)



“Mucosa-sparing” Tomo



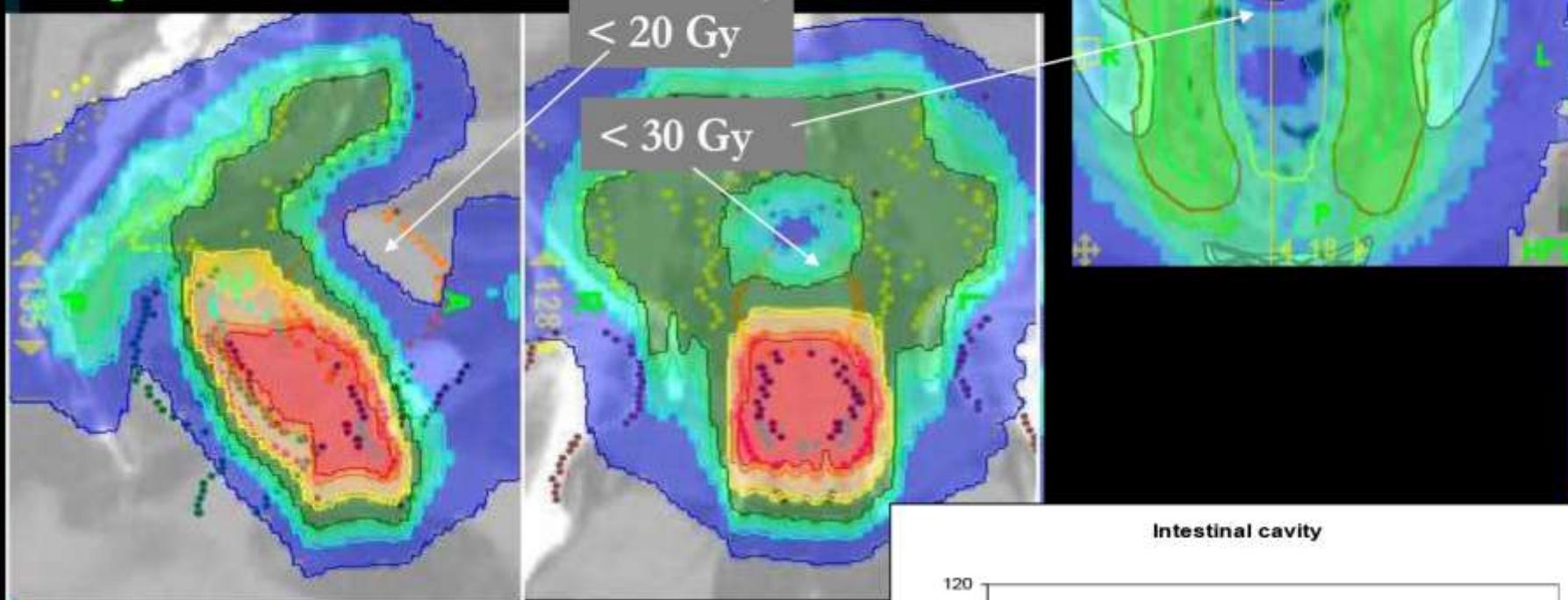
PROSTATA



- Elevata omogeneità di copertura nei PTV
- Risparmio retto e vescica
- Importante risparmio cavità intestinali, nel caso di irradiazione pelvica

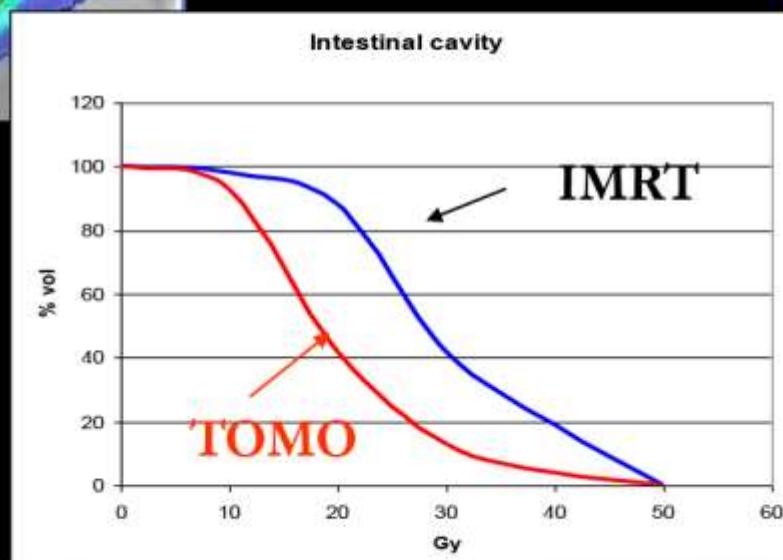
PROSTATA

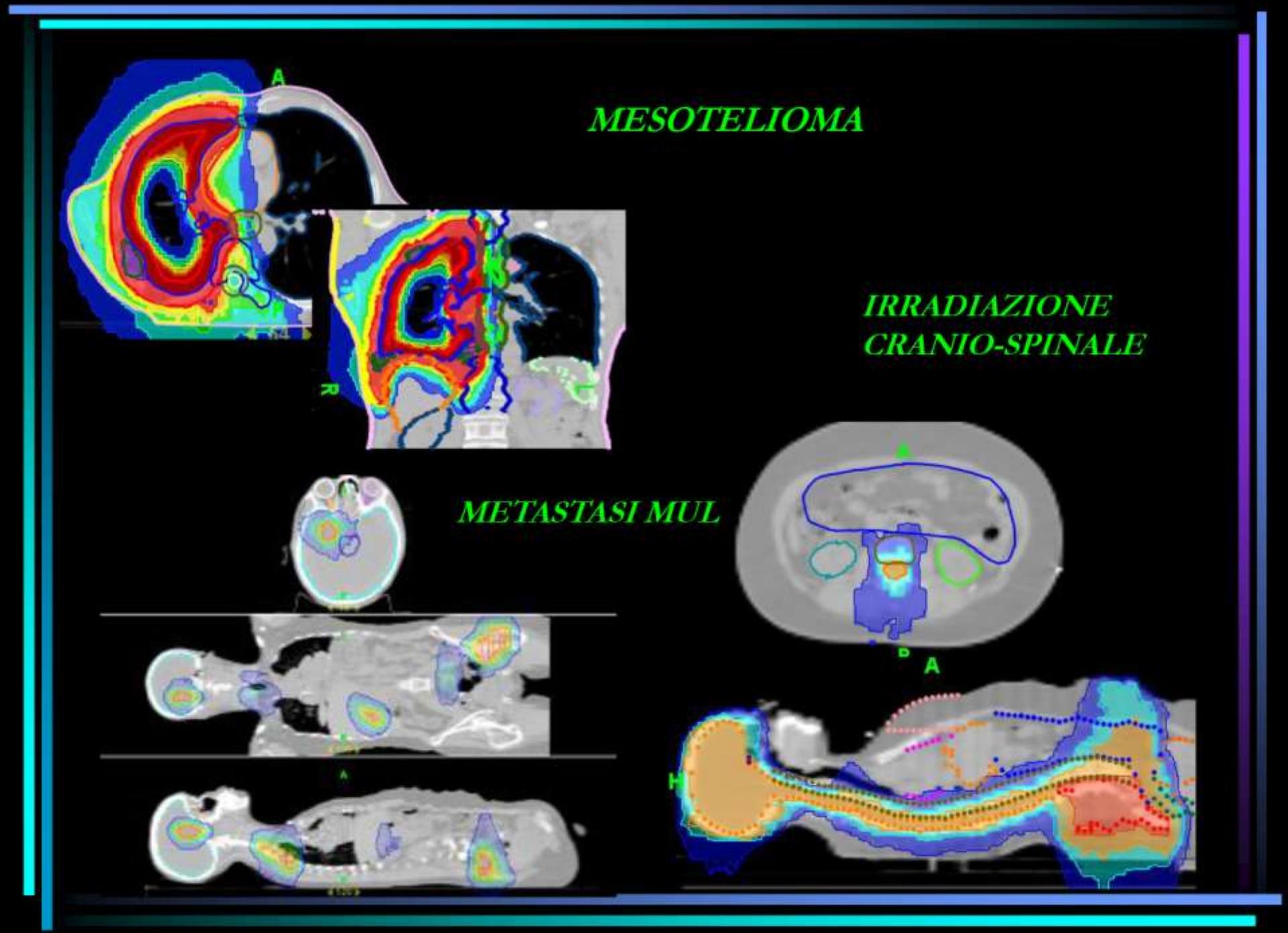
“Risparmio Cavità intestinale”



Esempio: Tomo vs 7-fields IMRT

■ D_{media}: 20 Gy vs 30 Gy





QA PAZIENTE

Verifica dell'accordo tra distribuzione di dose calcolata e misurata in fantoccio omogeneo. La verifica della dose viene fatta sia puntualmente con delle camere a ionizzazione che planarmente con pellicole radiografiche.

Operativamente...

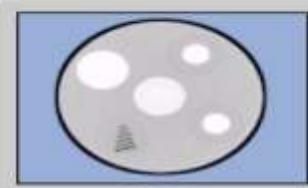
- Si esegue l' export della fluenza ottimizzata sul paziente su un fantoccio omogeneo, “Cheese Phantom” (cioè si esporta sul fantoccio la stessa configurazione di gantry e lamelle che si è ottenuta su paziente)
- Si esegue il calcolo della “nuova” distribuzione di dose su fantoccio: la combinazione gantry/fasci/lamelle è uguale a quella ottenuta su paziente ciò che cambia è la dose ricevuta sul fantoccio visto che paziente e fantoccio avranno spessori e densità differenti.

Verifica accordo misurato e calcolato

QA PAZIENTE

DOA Plan: Plan_01

Phantom Selector



Couch Controls:

- Remove Couch
- Insert Couch
- Revert to Orig
- Move Phantom

Phantom Tools

- C
- +
- Restore Position
- Move Phantom

Dose Calculation

Calculation Grid

Normal ▾

Start

Cancel

Create Delivery QA Procedures

Displayed Image

Patient Phantom

Isodose Selector

Patient

Plan Local

Restore From Plan

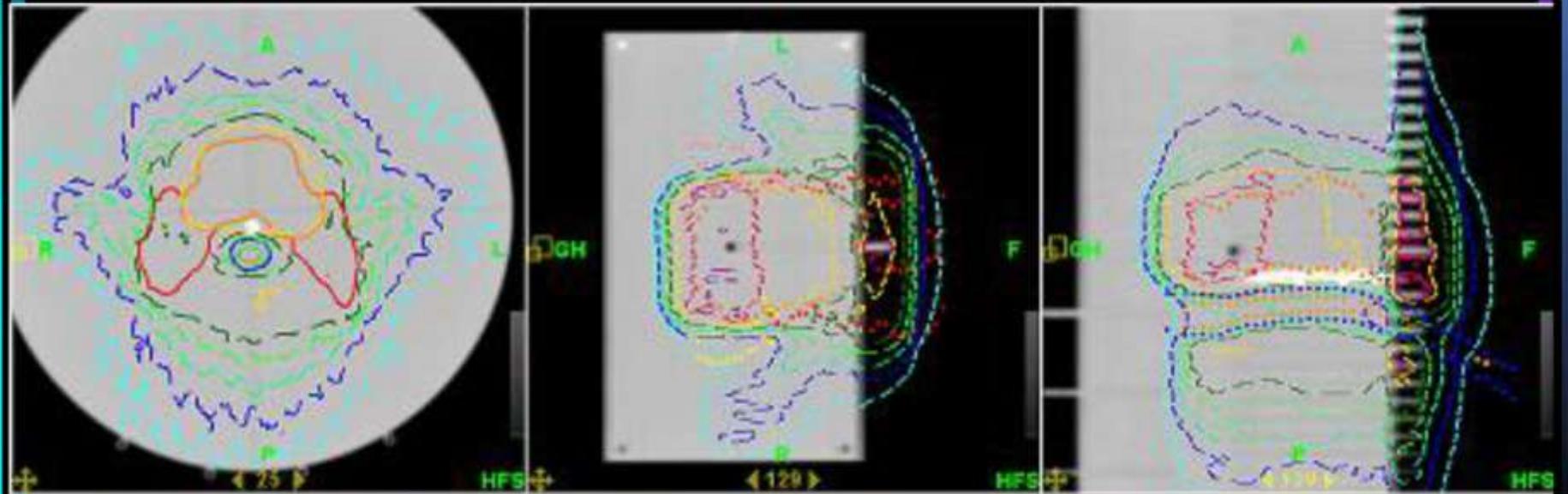
Phantom

Laser Control

View Lasers

Move lasers

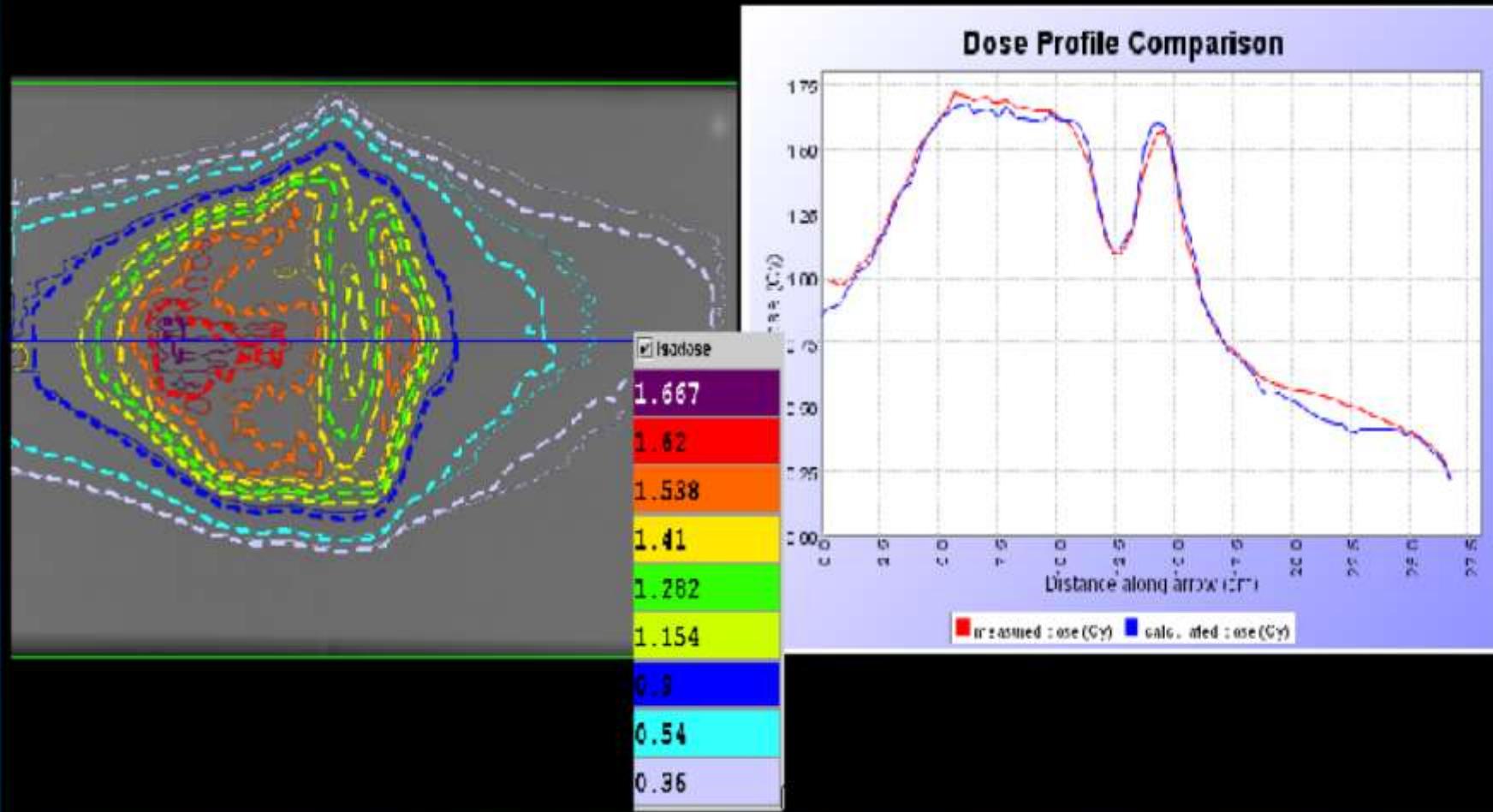
Save Position



QA PAZIENTE

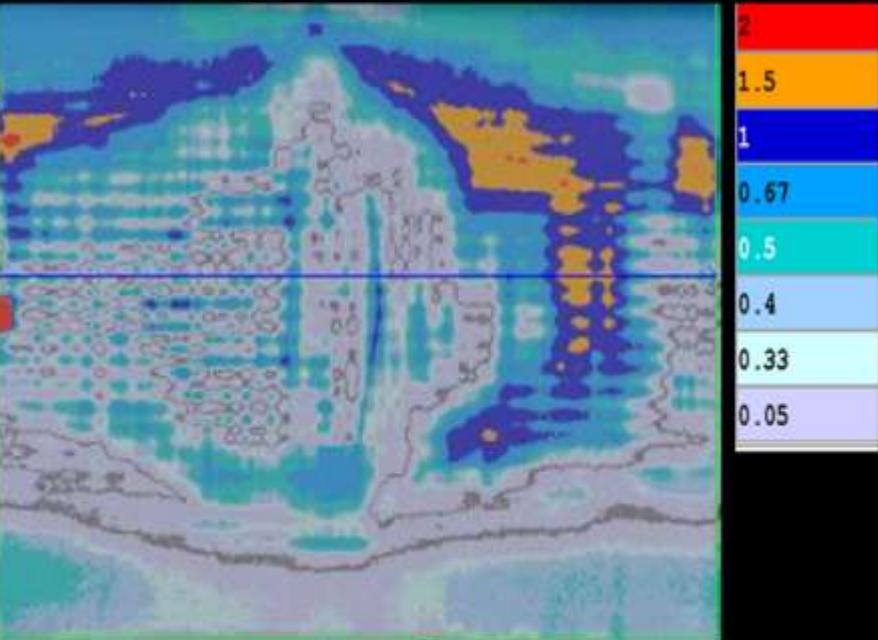
Film dosimetria: curve isodosi e profili

Cheese Phantom (film in sezione coronale, parallelo al lettino)



QA PAZIENTE

Film dosimetria: funzioni gamma

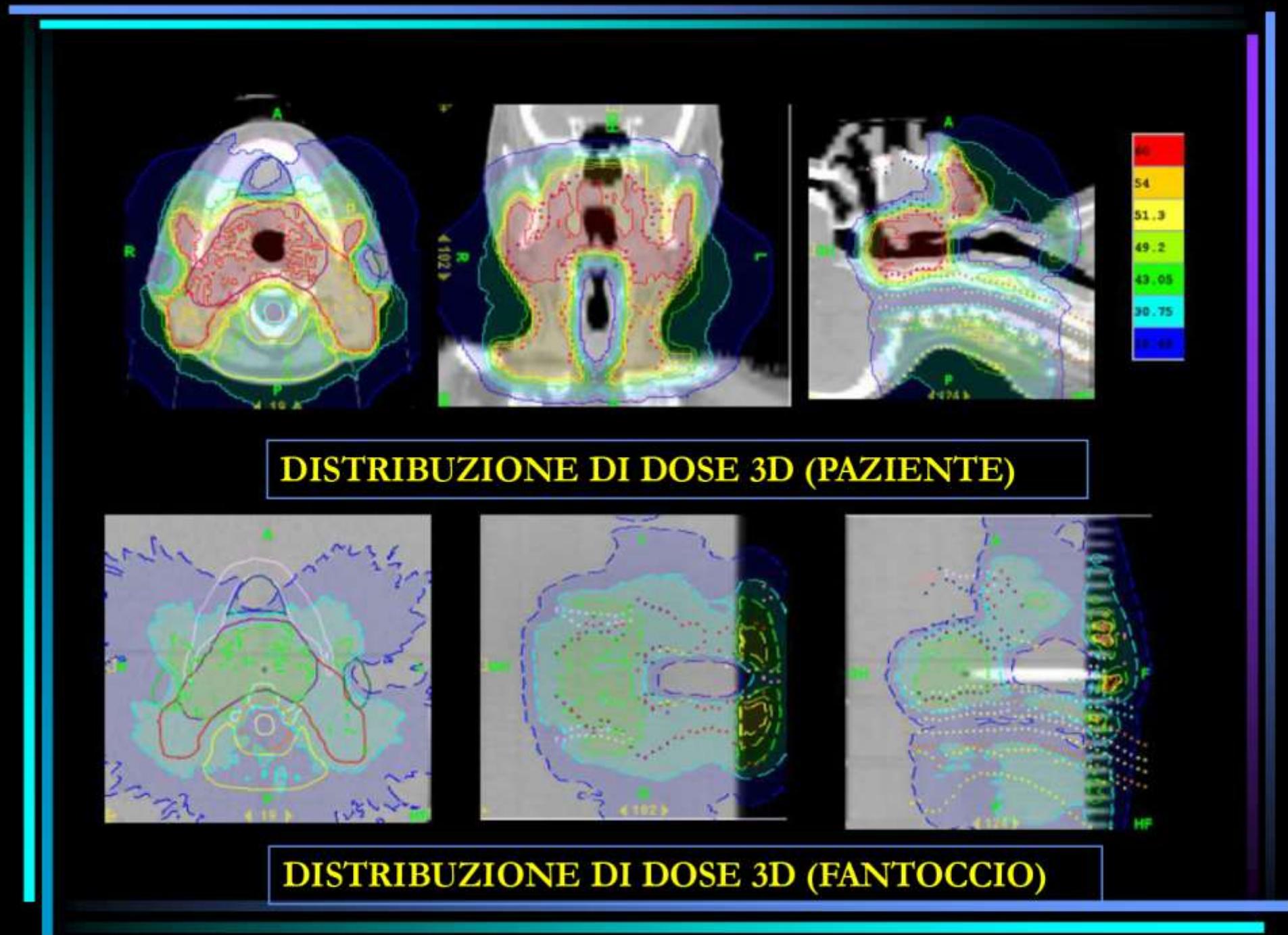


$$\gamma(r_m, r_c) = \sqrt{[\delta D(r_m, r_c)/\Delta D]^2 + [\delta r(r_m, r_c)/\Delta r]^2}$$

$$\gamma(r_m) = \min [\gamma(r_m, r_c)] \quad \Rightarrow \text{GAMMA}$$

Accordo tra dose calcolata e misurata in termini di differenza % di dose (ΔD) in regioni a basso gradiente e in termini di distanza tra isodosi (Δr) in punti ad alto gradiente.





CONCLUSIONI

Il sistema di Tomoterapia Elicoidale si propone come un'Unità di trattamento con il sistema di MVCT integrato dalle grandi potenzialità; caratteristiche peculiari del sistema sono: la compatezza meccanica e la semplicità del sistema IMRT, un singolo database per gestire pianificazione e trattamento. Data l'elevata tecnologia del sistema dedicato IMRT/IGRT, risulta necessaria una definizione di protocolli specifici che assicurino adeguate performance meccaniche e dosimetriche e la definizione di adeguati programmi di maintenance.

Il sistema HT consente grazie agli elevati gradienti di dose riproducibili, un aumento del controllo tumorale locale con conseguente riduzione degli effetti di detimento per le strutture sane, presenta inoltre un significativo miglioramento vs tecniche 3DCRT e IMRT in molte situazioni cliniche data la sua elevata precisione nell'erogazione del fascio.

Inoltre, grazie al sistema MVCT integrato, consente di effettuare Adaptive Radiotherapy e una eventuale riduzione dei margini nel contornamento laddove possibile.