

Esperienze degli ospedali lombardi a confronto nella radioterapia del distretto testa collo

IRCCS San Raffaele, Milano
26 Giugno 2008

Radioterapia del distretto testa collo con Cyberknife e valutazione della dose periferica



Federica Locatelli – Centro Diagnostico Italiano

M.Luisa Fumagalli – Fondazione IRCCS “C.Besta”

CyberKnife® a Milano

CDI - Centro Diagnostico Italiano

Il gruppo:



Radioterapia, Istituto "C.Besta"
Laura Fariselli, MD ; Ida Milanesi, MD;
MariaLuisa Fumagalli, PhD
Neurochirurgia, Istituto "C.Besta"
Giovanni Broggi, MD



Chirurgia extra-cranica, Ospedale "San Carlo"
Alberto Brambilla, MD



CDI CK Team
Giancarlo Beltramo, MD
Livia Corinna Bianchi, MD
Lorenzo Brait, PhD
Achille Bergantin, PhD
Federica Locatelli

Radioterapia:

ci riferiamo ad un trattamento nel quale viene erogata una alta dose di radiazioni in un numero elevato di frazioni

Radiochirurgia:

Termine che si riferisce all'erogazione in singola frazione di una alta dose di radiazioni ionizzanti

La radiochirurgia stereotassica

- La radiochirurgia stereotassica "classica" impiega un casco stereotassico (frame)
 - Necessario per stabilire un sistema di riferimento, mediante il quale localizzare il bersaglio
 - Necessario per immobilizzare il paziente
- Il casco stereotassico veniva indossato sia durante la scansione CT che durante il trattamento



Radiochirurgia con Linac "classico". Il casco stereotassico era necessario per definire un sistema di riferimento

CyberKnife: Frameless



La maschera termoplastica



Il cuscino a depressione

- I sistemi di immobilizzazioni non sono invasivi
- Non è necessaria anestesia
- Il riferimento stereotassico non è più un dispositivo esterno, ma la stessa anatomia ossea del paziente

Generalmente Testa-Collo:

- sopra C2-C3 solo maschera
- sotto C2-C3 maschera+cuscino



Sistema CyberKnife® per Radiochirurgia

Vantaggi clinici:

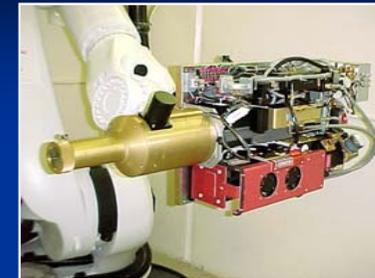
- Nessuna incisione
- Non richiede anestesia
- Non causa dolore al paziente
- Non richiede un recupero fisico del paziente dopo il trattamento
- Frameless: non richiede il casco stereotassico
- Permette di frazionare il trattamento e quindi di meglio salvaguardare i tessuti sani attorno al bersaglio
- Geometria di irradiazione non isocentrica: maggiore conformalità

CyberKnife®



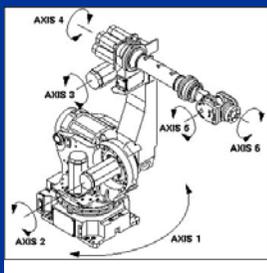
Acceleratore lineare

- compatto ~ 160 Kg
- Energia dei fotoni 6 MV
- Rate di dose 400 cGy/min
- 12 collimatori secondari
Ø 5-60 mm



Braccio robotizzato

- 6 gradi di libertà
- Superficie di lavoro : 4 m x 4,90 m
- Scarto quadratico medio di posizionamento: < 0.2 mm



Braccio robotizzato

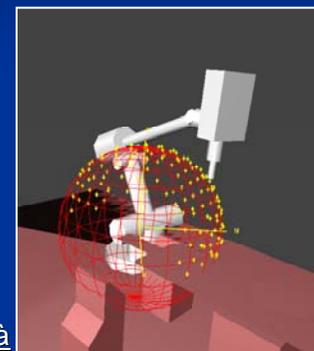
- 100 nodi principali
- 12 direzioni per nodo
- 1200 possibili orientazioni dei fasci



NON COMPLANARE
NON ISOCENTRICO

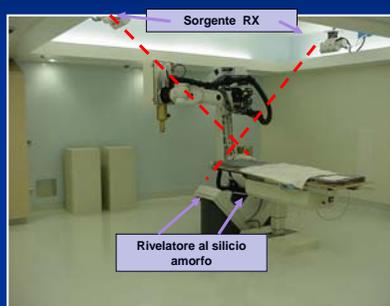
=

Elevato livello di conformalità



Localizzazione con sistema ad immagini

- 2 sorgenti di RX + 2 rivelatori a silicio amorfo
- immagini del paziente perpendicolari a 45° in rapporto alla verticale
- **Immagini acquisite durante il trattamento** e rapportato alle immagini DRR precedentemente create
- Prima di erogare la dose per ogni fascio **il braccio meccanico corregge la direzione** in rapporto alla posizione del paziente

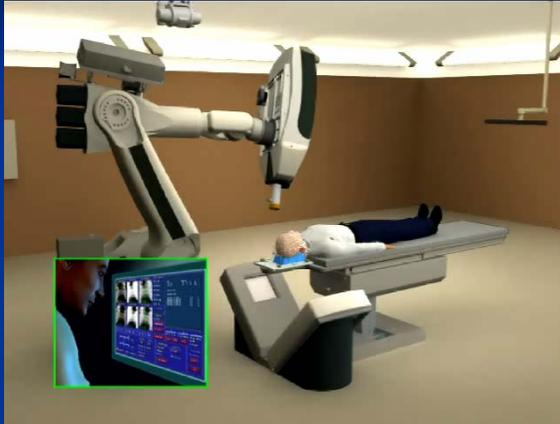


Rivelatori al silicio amorfo

- Rivelatori al silicio amorfo
- Allineamento delle coordinate del sistema RX con il sistema delle coordinate del robot
- 512 x 512 pixels : 400 µm di risoluzione

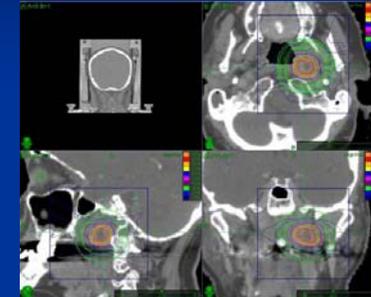


Il trattamento «radio-chirurgico»



Il sistema di pianificazione

- dedicato al CyberKnife®
- **DICOM RT**
 - CT (max 512 sezioni)
 - MR
 - PET
 - Dicom compatibile
- Tipi di pianificazione:
 - isocentrico**
 - conformato**



La procedura di pianificazione



Modalità di rilevamento della posizione del paziente

Cyberknife System ha un sistema di guida mediante immagini

- Per il cranio si utilizza l'anatomia ossea rigida (Skull Tracking)
- Per la colonna l'anatomia ossea e deformazioni (Xsight Spine)
- Per le lesioni testa collo si utilizza o il sistema Skull Tracking o il sistema Xsight Spine
- Per i tessuti molli la posizione dei fiducials impiantati (Fiducial Tracking)

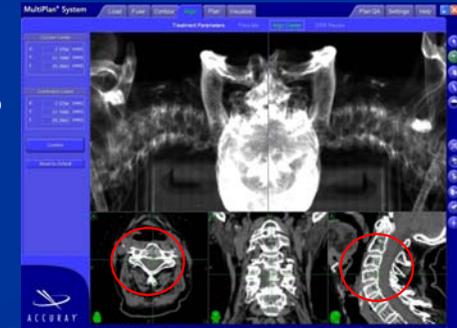
Localizzazioni intracraniche Skull Tracking



- Precisione di localizzazione
Traslazioni < 0.4 mm
Rotazioni < 0.3°

Localizzazione spina Xsight Spine

- Il sistema localizza lesioni in prossimità del rachide, no impianto di fiducial
si informazioni anatomiche della colonna
- In fase di contornamento è necessario delineare il "Volume Colonna" usato poi per la generazione delle DRR,
- target < 5 cm dalla vertebra scelta per la localizzazione



Visualizzazione della griglia scheletro

- due griglie, una sulle immagini DRR e l'altra sulle immagini radiografiche live,
- modifica dei parametri di rilevamento: soglia falsi nodi, soglia dxAB, altezza ROI, gamma di rilevamento

Parametri di rilevamento nella localizzazione Xsight

- **soglia falsi nodi (%)**: imposta una soglia per la percentuale di nodi rifiutati nella regione di interesse.
Falsi nodi=nodi in cui non si trova una correlazione tra le immagini DRR e le immagini live.
- **soglia dxAB bersaglio (mm)**: differenza assoluta tra le traslazioni Inf/Sup del centro griglia nelle due proiezioni,
- **altezza ROI (40-100mm)**: altezza della regione di interesse utilizzata per il rilevamento,
- **gamma di rilevamento (4-40mm)**: intervallo delle traslazioni del paziente in tutte le direzioni rilevabili dall'algoritmo Xsight.
↑ gamma di ricerca, ↑ possibilità di una corrispondenza errata.

Localizzazione con marker Fiducial Tracking



- Confronto tra la posizione dei fiducials nelle DRR e nelle immagini live
- L'errore totale dipende dal numero dei marker
- Gli errori di traslazione non dipendono dalla distanza tra i marker
- L'errore di rotazione \downarrow 50% raddoppiando la distanza tra i marker

Precisione clinica

- La precisione clinica totale è influenzata da:
 - Errore dovuto allo scanner CT
 - Errore dovuto al paragone DRR-immagini acquisite durante il trattamento
 - Errore di posizionamento del robot

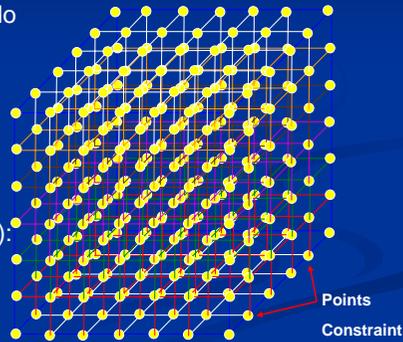
Trial	Error components (mm)			Tot. err. (mm)	Track mode	Target pos.
	A/P	R/L	I/S			
1	-0.41	-0.08	0.16	0.45	body	ant
2	0.17	0.25	0.24	0.38	head	ant
3	-0.28	0.03	0.19	0.34	body	ant
4	-0.06	0.27	0.31	0.41	head	ant
5	-0.17	-0.14	0.75	0.78	body	ant
6	-0.17	0.23	0.14	0.32	head	ant
7	-0.14	0.17	0.20	0.30	body	post
8	-0.13	0.10	0.30	0.34	body	post
9	-0.27	0.28	0.32	0.50	head	post
10	-0.44	-0.08	0.03	0.45	head	center
11	0.27	0.01	-0.21	0.34	head	center
12	-0.23	-0.85	0.10	0.89	head	center
13	-0.23	0.10	-0.30	0.39	head	center
14	-0.01	0.33	-0.23	0.40	body	center
AVE	-0.15	0.04	0.14	0.45		
SD	0.20	0.30	0.27	0.17		

Precisione clinica totale: **< di 0.95 mm**

Definizione della griglia di calcolo

Posizionare e dimensionare la griglia di calcolo in modo da includere le ROI dell'immagine CT

- Bassa risoluzione (ottimizzazione):
64x64x64 points
- Alta risoluzione (calcolo):
singolo voxel



I piani conformati

Ottimizzare una qualsiasi forma del target
Pianificazione inversa

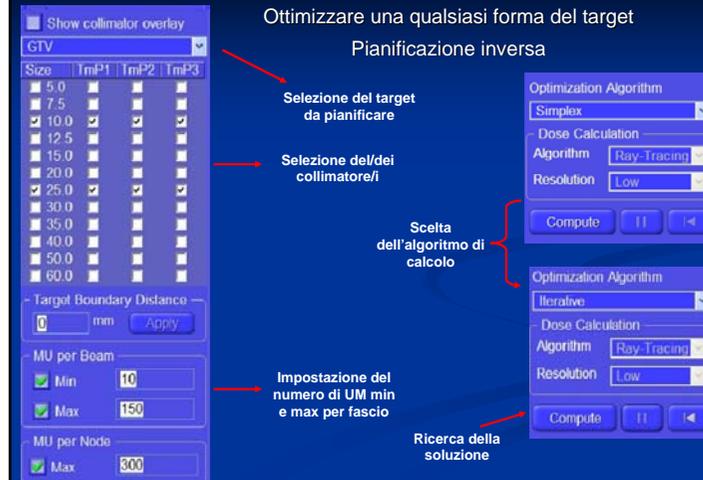
Selezione del target da pianificare

Selezione del/dei collimatore/i

Scelta dell'algoritmo di calcolo

Impostazione del numero di UM min e max per fascio

Ricerca della soluzione



Algoritmo di calcolo: **Simpleso**

Identifica la configurazione di dati ottimale che soddisfa i requisiti:

- ↓ n° tot UM,
- conformità alla dose max ai volumi critici,
- conformità alla dose min e/o max per il volume bersaglio e per gli eventuali punti definiti dall'utente

Algoritmo di calcolo: **Iterativo**

- Ottimizza le deviazioni superiori ai limiti massimi e inferiori ai limiti minimi della dose. Tale ottimizzazione inizia con un gruppo definito di geometrie di fascio.
- Con l'avanzare del processo i fasci a bassa dose sono reindirizzati sulle zone fredde del tumore.

Assegnazione della dose in pianificazione inversa

Impostazione dose min solo per il target

Impostazione dose max per il target e le strutture critiche

Impostazione dei "pesi" per il calcolo

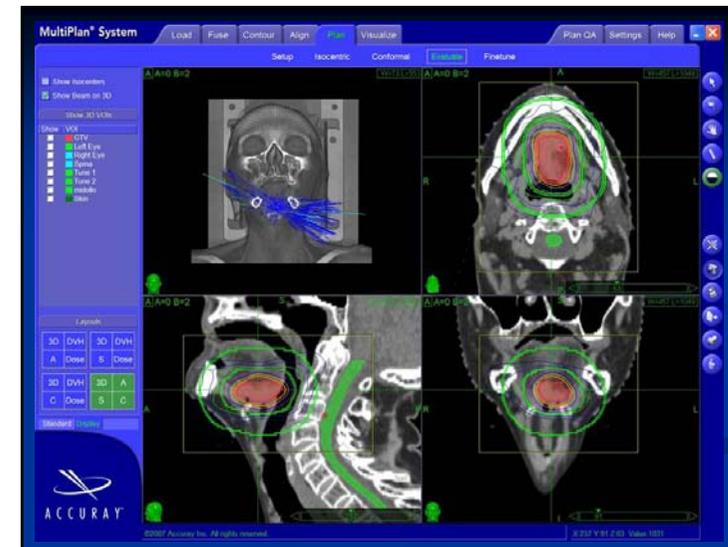
VOI Constraint	Point Constraint	# Constraints	Min(cGy)	Min Weight	Max(cGy)	Max Weight
GTV		100	1300.00	100	1625.00	100
Left Eye			n/a	n/a	0.00	0
Right Eye			n/a	n/a	0.00	0
Spina			n/a	n/a	5000.00	0
Tune 1			n/a	n/a	800.00	100
Tune 2			n/a	n/a	300.00	100
midollo			n/a	n/a	50.00	100

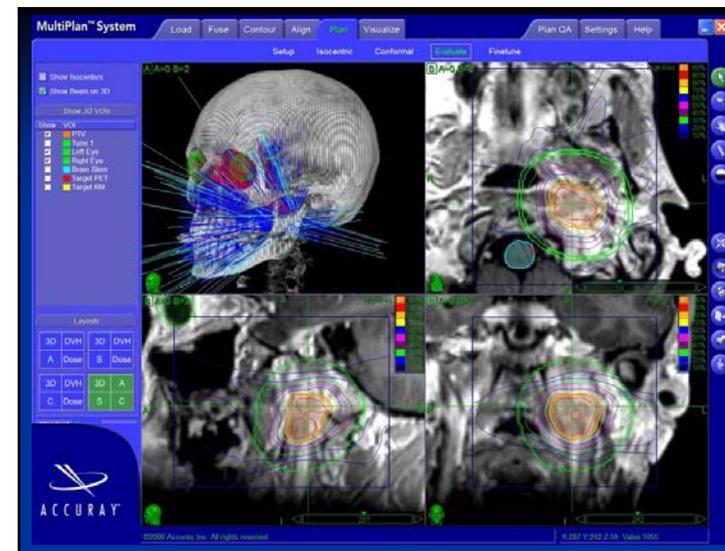
VOI	Boundary Only	Skip	Constraints
GTV	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 1150
Left Eye	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 0
Right Eye	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 0
Spina	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 0
Tune 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2 1400
Tune 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4 2117
midollo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1 1104

Possibilità di aggiungere manualmente dei punti con vincoli di dose

Elenco del target e delle strutture critiche presenti

"controllo" dei punti totali occupati nella griglia di calcolo





Cyberknife C.D.I - Milano

Head and Neck

- Seni paranasali 10 pz (5 Gy x 4 fz)
- Residui e/o recidive di carcinoma rinofaringe 6 pz (8 Gy x 3 fz)
- Parotide 2 pz (8 Gy x 3 fz)
- Neurinomi dell'acustico 130 pz (12Gy x 1fz, 6 Gy x 3fz)

Conclusioni

Valida tecnica per:

- Residui tumorali (resezioni parziali)
- In associazione alla RT convenzionale (boost)
- Rittrattamenti
- Lesioni non operabili / rifiuto del paziente
- Lesioni situate in siti vicino ad organi critici

Radioterapia del distretto testa collo con Cyberknife valutazione della dose periferica

- Trattamenti del distretto testa-collo: dose rilasciata al target 5-8 Gy/frazione

Trattamenti stereotassici vs trattamenti convenzionali:

- Aumento delle unità monitor (U.M.) per erogare la dose stabilita
- Aumento del numero di fasci non complanari



Misura della dose periferica

Dose periferica:

dose rilasciata al di fuori dei confini geometrici del fascio

Contributi:

- Radiazione di fuga (*leakage*) dall'acceleratore
- *Scattering* da parte di collimatori e modificatori dei fasci
- *Scattering* interno al paziente
- Fasci in ingresso e in uscita dal target

Materiali e metodi

Trattamento radiochirurgico frazionato con due differenti apparecchiature:

- CyberKnife
- LINAC con DMLC

Il trattamento è stato effettuato su un fantoccio antropomorfo tessuto-equivalente:

- Fantoccio Alderson RANDO

Misura della dose all'interno del fantoccio con dosimetri a termoluminescenza:

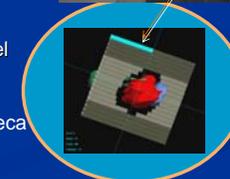
- LiF TLD -100

LINAC Philips SL75-5 (I.R.C.C.S. C. Besta – Mi)

Acceleratore lineare:
fotoni E=6 MV

- Possibilità di ruotare la testata per eseguire trattamenti ad arco con fasci non coplanari ed isocentrici.
- L'inserimento di un collimatore multilamellare (*mMLC* 4 mm all'isocentro) consente una conformazione dinamica del fascio.

*caschi stereotassici fissati alla teca cranica (SRS) o al calco dentale (SRT) del paziente.



CyberKnife (Centro Diagnostico Italiano - MI)

Acceleratore lineare: fotoni di energia 6 MV montato su un braccio robotico.

- Più di 1200 posizioni di irraggiamento
- Collimatore cilindrico di diametro \varnothing 5 -60 mm
- Sistema di localizzazione *Image Guided*



Misure

I piani sono stati elaborati per un fantoccio Alderson-Rando

Sulle immagini TC (spessore 1.25 mm) contorno target (seno cavernoso) e tiroide
Nel fantoccio sono stati individuati 20 punti di misura nei quali sono stati inseriti 2 TLD LiF 100.

Target
Tiroide
Sterno
Polmone sup
Polmone inf
Gonadi F
Gonadi M



Dosimetri a termoluminescenza

Risposta

- lineare tra 0.2 mGy e 10 Gy circa
- indipendente dall'angolo di incidenza dei fasci
- errore nella lettura 5%
- errore nel posizionamento <2mm
- taratura, misura del fattore di sensibilità intrinseco e misura di dose presso Lab. Radioprotezione CESNEF (Politecnico di Milano)

Piani di trattamento

LINAC con DMLC

- Sistema di piani di trattamento di tipo diretto

Il fisico imposta direttamente la geometria, il peso dei fasci e la dose al target per ottimizzare l'irraggiamento.

CyberKnife

- Sistema di piani di trattamento di tipo inverso

Assegnata la dose al target e i limiti di dose agli organi critici, il sistema propone una soluzione geometrica di irraggiamento

Parametri dei due piani di trattamento utilizzati:

dose e isodose di prescrizione, geometria di irraggiamento.

Strumento	Sito	Vol(cc)	Strutt a rischio	Isodose di preser	% target coperto
CyberKnife	Encefalo	15	nv ott ex	70	95
			nv ott dx		
			tiroide		
LINAC+DMLC	Encefalo	15	nv ott ex	70	100
			nv ott dx		
			tiroide		

CyberKnife	Collimatore (mm)	N° archi CK	N° U.M. tot	Dose all'ID (%)	Dose max
	20	3	2030	500 cGy	724 cGy
LINAC+DMLC	Magino (mm)	N° archi	N° U.M. tot	Dose all'ID (%)	Dose max
	1	4 (da 90°)	936	500 cGy	737 cGy

Trattamento non-isocentrico del **CyberKnife**, si possono vedere in azzurro i fasci attivi, in verde gli organi a rischio

Trattamento al **LINAC con DMLC**, abbiamo impostato gli archi in modo che colpissero il target dall'alto, come accade nel trattamento con CK.

Misura della dose periferica

Risultati:
Dosi periferiche CyberKnife >> dosi periferiche LINAC con DMLC

Distanza dal target (cm)	CyberKnife (mGy)	LINAC con DMLC (mGy)
15.5	51.7	46.3
30.5	28.55	9.95
43	16.5	5.72
53	14.1	3.1
75.5	9.1	1.3
80.5	9.05	1.15

Distanza cranio-caudale dal target	Posizione anatomica	Dose CyberKnife	Dose LINAC+DMLC	Dose CK/Dose LINAC
15.5 cm	Parte sx della tiroide	51.7 mGy	46.3 mGy	1.12
15.5 cm	Parte dx della tiroide	49.7 mGy	43.8 mGy	1.05
30.5 cm	Sterno	28.55 mGy	9.95 mGy	2.87
43 cm	Polmone sup	16.5 mGy	5.72 mGy	2.88
53 cm	Polmone inf	14.1 mGy	3.1 mGy	4.55
75.5 cm	Gonadi (f)	9.1 mGy	1.3 mGy	7.00
80.5 cm	Gonadi (m)	9.05 mGy	1.15 mGy	7.86

Causa:

- Direzioni dei fasci oblique e sagittali?
- Scattering dei tessuti?
- Radiazione di perdita dall'acceleratore (leakage radiation)?

Contributi alla dose periferica nei trattamenti con CyberKnife

- Fantoccio formato da una testa antropomorfa (*Theodor Accuray phantom*) e da strati di acqua solida per simulare il resto del corpo
- Irraggiamento a diverse angolazioni e con tutti i collimatori disponibili (Ø 0-60mm)
- Dose misurata tramite camera a ionizzazione tipo Farmer posizionata in corrispondenza delle gonadi e della tiroide di una persona standard

Contributi alla dose periferica nei trattamenti con CyberKnife

Le dosi misurate, dovute a fasci collimati con il collimatore di diametro massimo (60 mm), confrontate con le misure di *blanc* (collimatore chiuso) con i fasci orientati allo stesso modo

hanno evidenziato che:

- la dimensione del collimatore **non** influenza la dose rilasciata a distanza dal target
- sotto i 30 cm la dose periferica dipende fortemente dalla posizione assunta dal robot
- **oltre i 30 cm la radiazione di fuga è il contributo dominante della radiazione esterna ai confini geometrici del fascio**
- a livello delle gonadi, il contributo di dose dovuto alla radiazione di fuga è superiore al **95 %**.

Dose periferica nei trattamenti CyberKnife

I risultati dello studio sulle dosi periferiche sono in accordo con quelli ottenuti dal Dipartimento di Radiazione ed Oncologia della University of California di San Francisco e dall' Università di Rotterdam ed evidenziano

presenza di anello ad alto *leakage* oltre il collimatore secondario



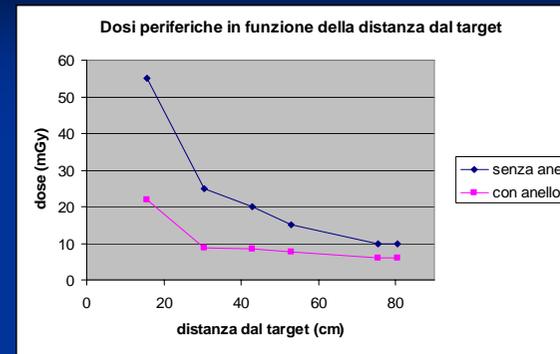
applicazione di una schermatura supplementare sulla testata dell'acceleratore costituita da un anello di tungsteno.

Parametri dei piani di trattamento effettuati con CyberKnife su una lesione a livello del seno cavernoso, prima e dopo l'applicazione dell'anello schermante.

	Volume Target (cc)	Dose di Prescrizione (Gy)	Isodose di prescrizione	U.M totali	C.I.	H.I.	Copertura del target
Piano tratt A (CK pre anello)	15	5	70 %	2030	1.55	1.45	95 %
Piano tratt B (CK post anello)	15	5	70 %	2530	1.29	1.45	97.75 %

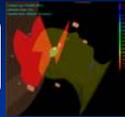
Dose periferica nei trattamenti CyberKnife pre e post applicazione di anello schermante

Distanza dal target (cm)	Dosi CK pre anello (mGy)	Dosi CK post anello (mGy)	Riduzione della dose con anello
30.5	27.5	9.1	66.9 %
43	17.5	7.7	56.0 %
53	15	8.3	44.7 %
75.5	10	5.8	42.0 %
80	10	5.8	42.0 %

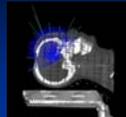


Piani di trattamento

LINAC con mMLC
LINAC con coni

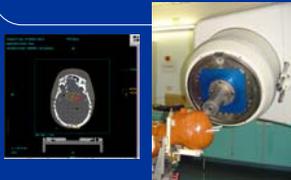


CyberKnife



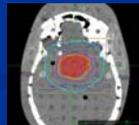
Pianificazione diretta: il fisico imposta

- dose di prescrizione
- ampiezza e angolazione degli archi,
- apertura dei collimatori,
- peso dei fasci,
- griglia di calcolo



Pianificazione inversa: il fisico imposta

- dose e isodose di prescrizione,
 - limiti di dose agli OAR,
 - U. M. massime per ogni fascio;
- il sistema propone una soluzione di irraggiamento



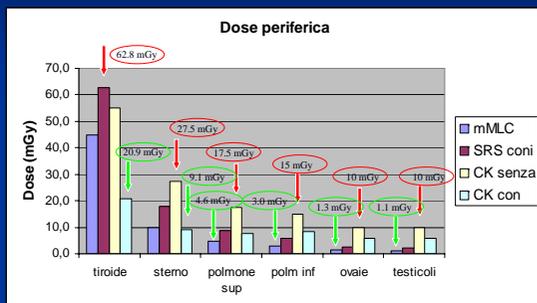
Parametri dei piani

si è cercato di impostare la stessa isodose di prescrizione e una geometria di trattamento simile.

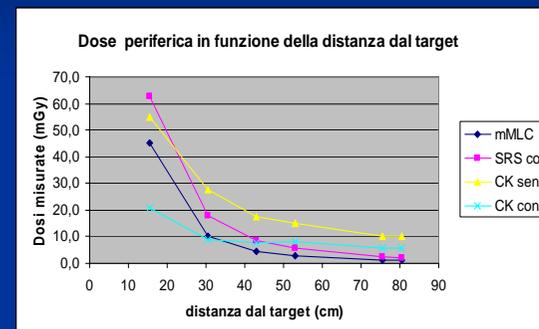
Copertura PTV * vol isodose prescr
PTV

Modalità di trattamento	Volume target (cc)	Dose di prescrizione (Gy)	Isodose di prescrizione	U.M. totali	new C.I.	Copertura del target
LINAC-mMLC	15	5	70 %	936	1.55	99 %
LINAC-Coni	15	5	70 %	1953	1.47	95 %
CyberKnife senza anello	15	5	70 %	2030	1.55	95 %
CyberKnife con anello	15	5	70 %	2530	1.29	97.75 %

Dose periferica nei trattamenti CyberKnife pre e post applicazione di anello schermante vs LINAC con mMLC e coni stereotassici



Dose periferica nei trattamenti CyberKnife pre e post applicazione di anello schermante vs LINAC con mMLC e coni stereotassici



Valori di dose periferica espressi in mGy /U.M. impostate nei trattamenti

Distanza Cranio-caudale dal target (cm)	Dose periferica espressa in mGy/ U.M. tot.nel trattamento			
	LINAC mMLC	LINAC Coni	CK senza anello	CK con anello
30,5	0.0110	0.0092	0.0140	0.0036
43	0.0049	0.0045	0.0086	0.0030
53	0.0032	0.0030	0.0074	0.0033
75,5	0.0014	0.0013	0.0049	0.0023
80	0.0012	0.0011	0.0049	0.0023

L'aumento delle U. M. impostate nei trattamenti di radioterapia stereotassica e radiochirurgia ha fatto nascere l'esigenza di acquisire informazioni sulla dose rilasciata a distanza dal target

Dose periferica e... stima del rischio di induzione di effetti stocastici

Sede anatomica dosimetro	dist dal target lungo l'asse cranio-caudale (cm)	LINAC mMLC dose (mGy)	LINAC-Coni dose (mGy)	CK senza anello dose (mGy)	CK con anello dose (mGy)
target ant	0	8200	9695/9199	7900	6908
target post	0	7500	6915/6234	6800	7425
nv ottico dx	0	480	533/414	870	867/464
nv ottico sx	0	870	1106/1119	340	369
tiroide sx	15,5	46,3	66,4	55	21,9
tiroide dx	15,5	43,8	59,2	55	19,9
tiroide sup	15,5	35,1	50,5	45	19,2
sterno ant	30,5	10	17,9	30	9,25
sterno post	30,5	9,9	18,1	25	8,9
polm ant dx	43	5,1	9,4	20	8,9
polm ant sx	43	4,7	8,9	20	8,6
polm post dx	43	3,9	8,2	15	6,6
polm post sx	43	4,6	8,4	15	6,8
polm inf dx	53	3,1	5,7	15	8,8
polm inf sx	53	3	5,9	15	7,8
gonade dx f	75,5	1,3	2,6	10	6,3
gonade sx f	75,5	1,3	2,6	10	5,7
gonade dx m	80,5	1,1	2,2	10	5,9
gonade sup m	80,5	1,1	2,2	10	5,8
gonade sx m	80,5	1,1	2,2	10	5,9

Stima del rischio di induzione di effetti stocastici

La stima del rischio di

- induzione di tumore,
- induzione di effetti ereditari,

è stata effettuata utilizzando il modello proposto dall'ICRP 103 (2007)

Rischio nominale (casi per 10000 persone per Sv)

Tessuto	Totale	Fatali	Non fatali
Tiroide	33	2,3	30,7
Polmone	114	101,5	12,5
Ovaio	11	6,3	4,7
Gonadi (eff ereditari)	20,0	16,0	4,0

- I valori presentati dall'ICRP, basati sul modello lineare senza soglia, sono stati calcolati per avere un riferimento concreto nella valutazione dei rischi e dei benefici legati ad una pratica e presentano un'incertezza elevata
- La stessa Commissione sconsiglia di usarli per deduzioni a priori del manifestarsi di un danno stocastico
- Ciò nonostante, i risultati ottenuti dall'applicazione di modelli di questo tipo rimangono l'unico parametro per stimare il rischio di induzione di tumore e di danno genetico causati da basse dosi da radiazione

Il modello ICRP indica che la probabilità di danno è trascurabile per il trattamento (5 Gy all'isodose di riferimento 70 % per 4 frazioni)

Rischio nominale (casi per 10000 persone trattate)

tessuto	LINAC con mMLC			LINAC con coni			CK senza anello			CK con anello		
	tot	let	non let	tot	let	non let	tot	let	non let	tot	let	non let
Tiroide	5,9	0,4	5,5	8,3	0,6	7,7	7,3	0,5	6,8	2,8	0,2	2,6
polmoni	1,7	1,5	0,2	3,3	3,0	0,3	7,5	6,7	0,8	3,6	3,2	0,4
gonadi	0,06	0,032	0,028	0,11	0,06	0,05	0,44	0,24	0,19	0,25	0,14	0,10
Gonadi (eff ereditari)	0,1	0,08	0,02	0,2	0,16	0,04	0,8	0,64	0,16	0,5	0,4	0,1

- La probabilità di sviluppare un tumore alla tiroide dopo il trattamento di RT stereotassica con i collimatori coni è dello 0,08 %
- La dose periferica rilasciata nei trattamenti considerati porta a un rischio di contrarre secondi tumori molto basso per tutti gli organi presi in esame
- Risulta trascurabile anche il rischio di induzione di effetti ereditari per irraggiamento delle gonadi

Stima del rischio di induzione di effetti stocastici (induzione di tumore e di effetti ereditari) per i trattamenti effettuati con CyberKnife su una lesione a livello del seno cavernoso, prima e dopo l'applicazione dell'anello

tessuto	Rischio nominale (casi per 10000 persone trattate)					
	CK senza anello			CK con anello		
	totale	fatali	non fatali	totale	fatali	non fatali
Tiroide	7.3	0.5	6.8	2.8	0.2	2.6
Polmone	7.5	6.7	0.8	3.6	3.2	0.4
Ovaio	0.44	0.25	0.19	0.25	0.14	0.19
Gonadi (eff ereditari)	0.8	0.64	0.16	0.5	0.4	0.1

L'applicazione dell'anello schermante è utile a contenere le dosi periferiche e quindi a diminuire la probabilità che si manifestino effetti di tipo stocastico

Conclusioni

- L'eccessiva dose periferica nei trattamenti con CyberKnife è da attribuire alla radiazione di perdita (*leakage radiation*)
- Decisione da parte della ditta costruttrice di applicare un anello di tungsteno attorno al collimatore secondario → Dose periferica ridotta del 70%
- La dose periferica è comunque bassa dose (no effetti di tipo deterministico)

TESSUTO ED EFFETTO	SOGLIA DI DOSE		
	Equivalente di dose totale ricevuto in una singola levee applicata (Sv)	Equivalente di dose totale ricevuto per esposizioni fortemente frast. o protratte.	Dose annuale se ricevuta per esposizioni fortemente frastinate o protratte (Sv/anno)
Testicoli			
Sterilità temporanea	0.15	n.a.	0.4
Sterilità permanente	3.5	n.a.	2.0
Ovaie			
Sterilità	156.0	6.0	<0.2
Cristallino			
Opacità osservabili	0.5-2.0	5.0	< 0.1
Deficit visivo (costante)	5.0	<0.0	< 0.15

- I risultati dello studio sulle **dosi periferiche** sono in accordo con quelli ottenuti dal Dipartimento di Radiazione ed Oncologia della University of California di San Francisco e dall' Università di Rotterdam