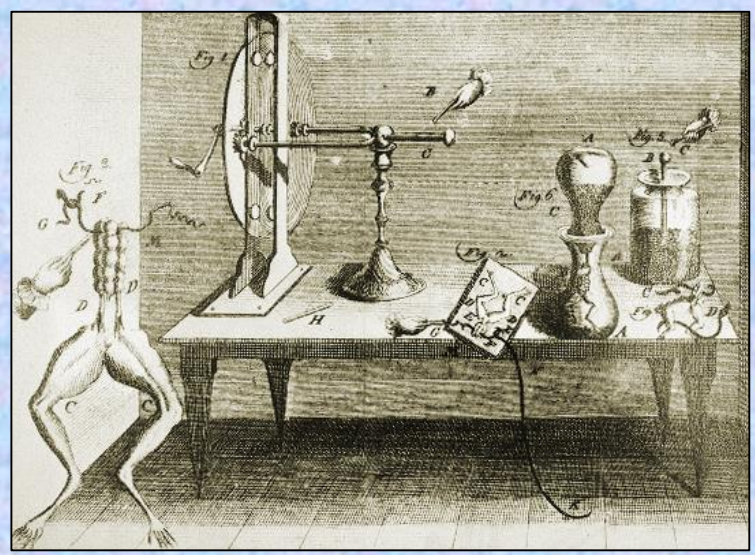
Società Italiana di Fisica
102° Congresso Nazionale
Padova, 27 settembre 2016

La Fisica Medica: utilitas in veritate

Giampiero Tosi
già
Dipartimento di Scienze Fisiche -Università di Milano Bicocca
Ospedale Niguarda Ca' Granda e IEO - Milano

- **Cenni storici**
- **Tecnologie fisiche in Medicina**
- **La Fisica Medica e i Fisici Medici in Italia**
- **La formazione dei Fisici Medici**
- **Stato attuale e prospettive della Fisica Medica in Italia**



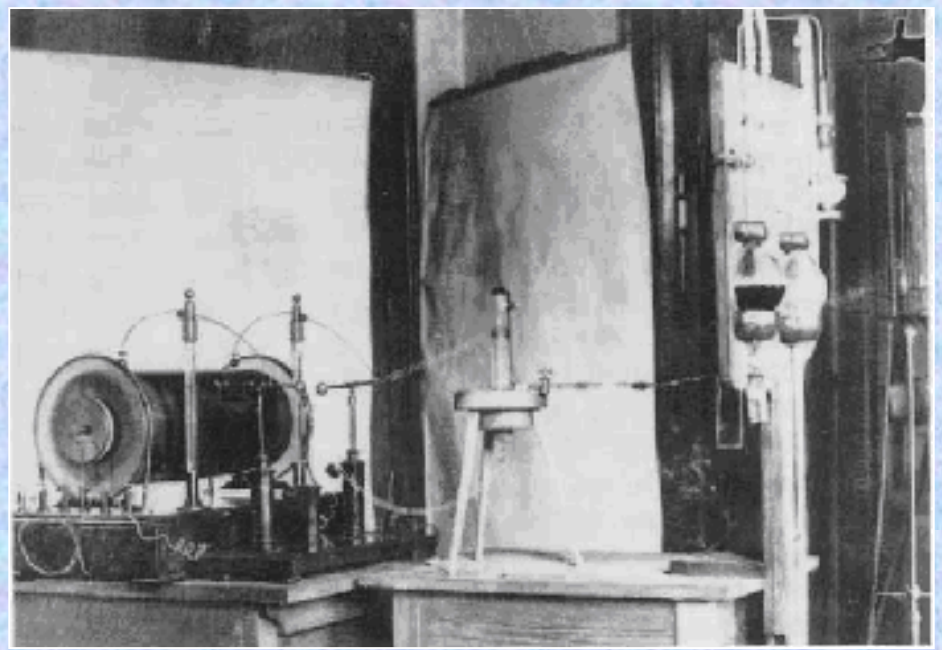
De viribus electricitatis in motu muscolari

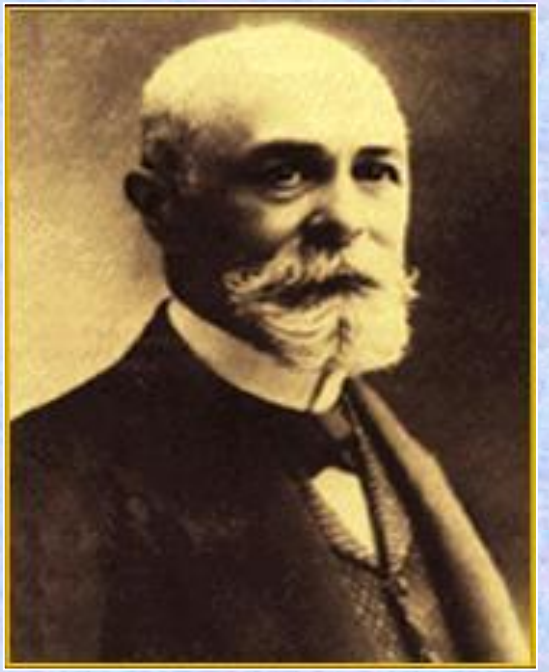
La Fisica Medica, intesa come quella branca della Fisica che studia sistematicamente le applicazioni alla Medicina delle scoperte della Fisica e delle relative «ricadute tecnologiche» è una disciplina giovane, anche se ormai ultracentenaria.

La sua data di nascita può essere collocata nell'ultimo decennio del XIX secolo, con le scoperte dei raggi X e della radioattività.

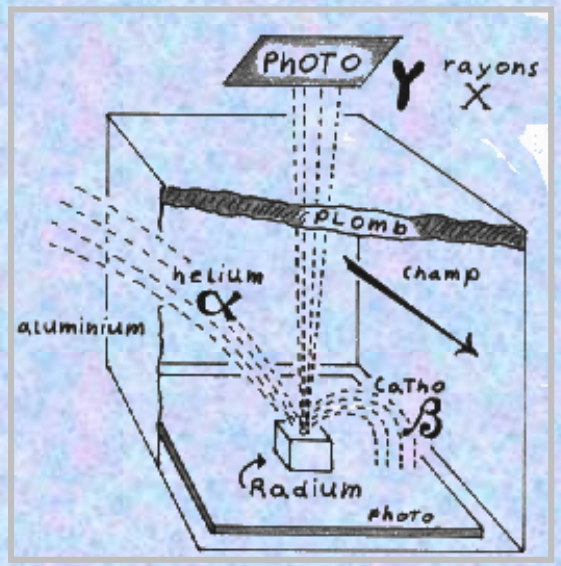
Raggi X e radioattività che ancor oggi sono alla base di alcune delle applicazioni più importanti della Fisica alla Medicina.

W. C. Röntgen, il "fotografo dell'invisibile", può essere considerato il padre della "diagnostica per immagini"



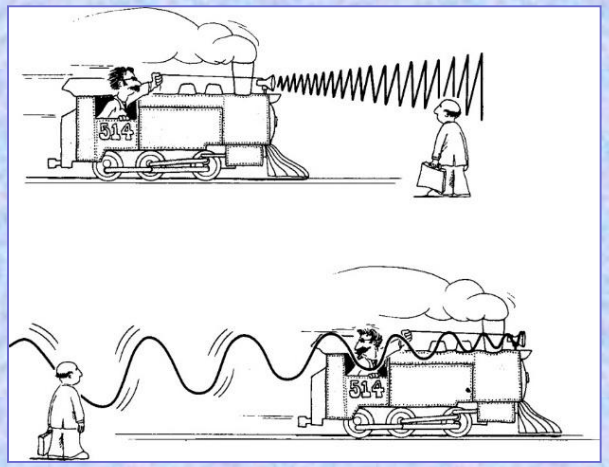


Henry Becquerel, con Marie e Pierre Curie, possono essere considerati i "padri" della Radioterapia, per essere stati i primi a intuire di poter utilizzare le radiazioni emesse dal radio nella cura dei tumori



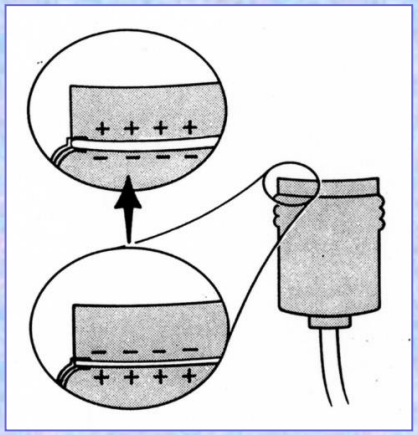
1845

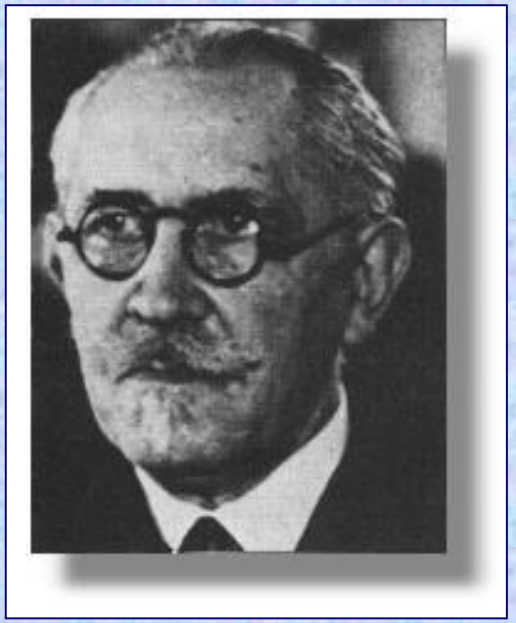
Christian Andreas Doppler scopre l'effetto che porta il suo nome



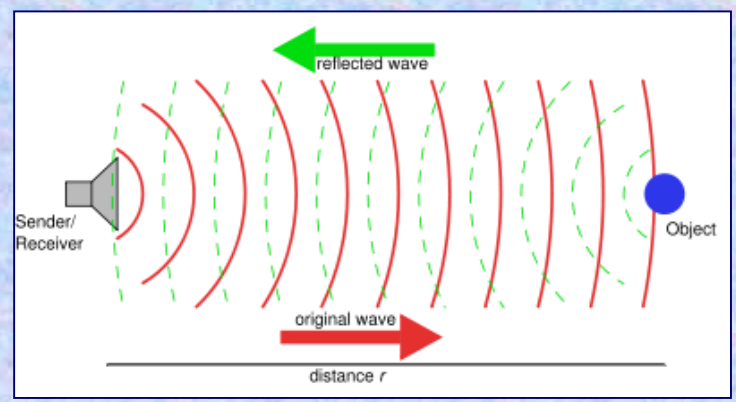
1880

Pierre e Jacques Curie scoprono in cristalli di tormalina l'effetto piezoelettrico





1916
Paul Langevin inventa il sonar



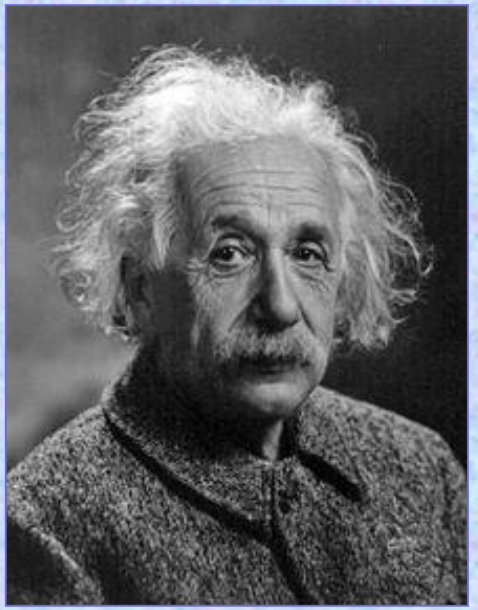
Doppler, Pierre e Jacques Curie, Langevin possono essere considerati i "padri" dell'impiego degli ultrasuoni nella diagnostica medica (ecografia, ecotomografia, eco-doppler) e, da non molto tempo, nella terapia, oncologica e non oncologica (HIFU)

Un protagonista dimenticato

J.H. RADON, 1917

Ricostruzione di immagini a partire da loro proiezioni
Retroproiezione filtrata - “Filtered back-projection”

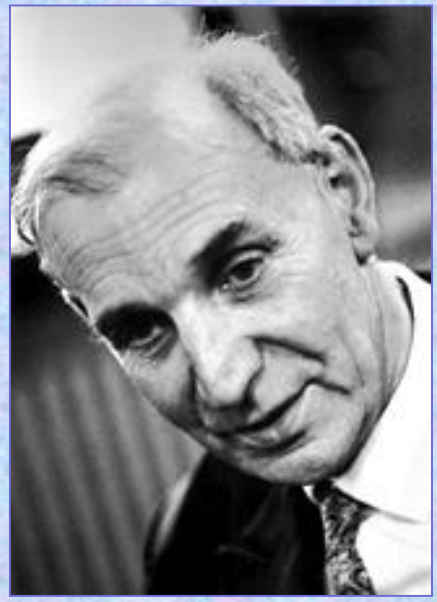
Berichte Sachsichen Akademie der Wissenschaften
Mathematisch-Physische Klasse



Non solo radiazioni ionizzanti: il laser

Einstein, 1917: Zur Quantentheorie der Strahlung (coefficienti di assorbimento e di emissione spontanea e stimolata di radiazione em)

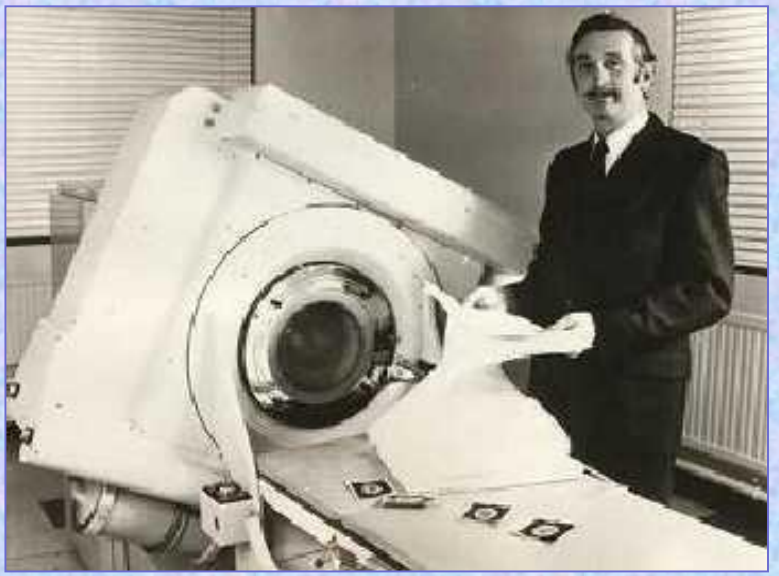
Kastler, anni ‘50: Il pompaggio ottico



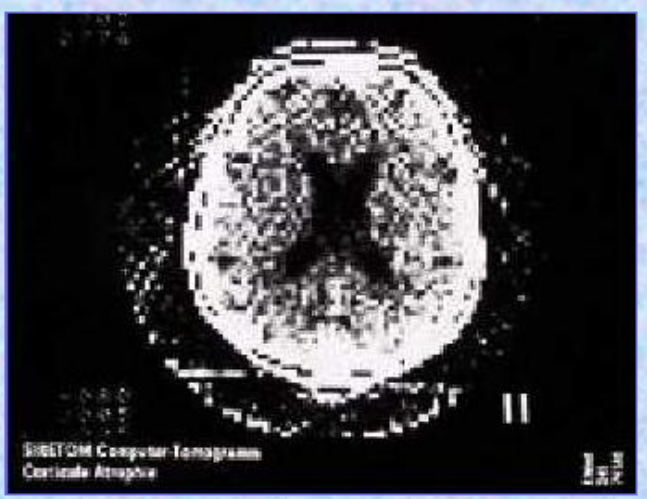
La radioattività artificiale (1933)

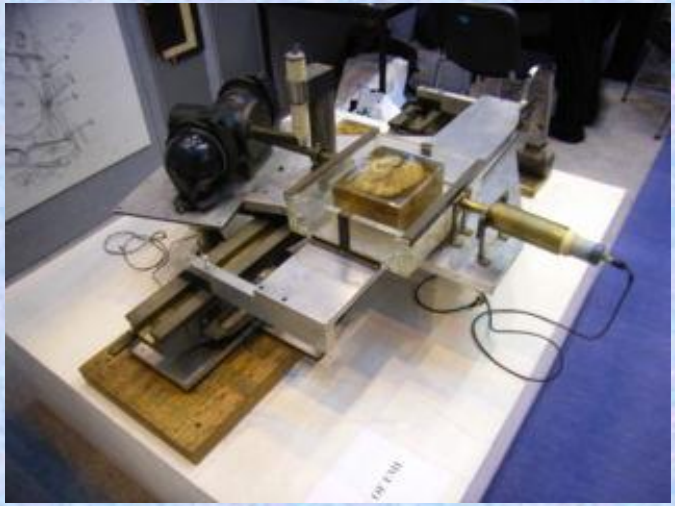
Irène Curie e Frederic Joliot

La scoperta dei coniugi Joliot ha costituito il presupposto per la nascita e lo sviluppo della moderna Medicina Nucleare

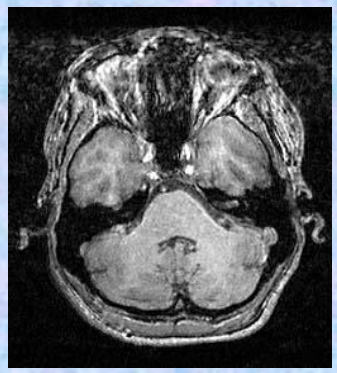


Nel 1967 G.N. Hounsfield, il "padre fondatore" dell'imaging digitale, realizza la prima apparecchiatura per tomografia computerizzata





Nel 1973 e negli anni successivi Paul Lauterbur e Peter Mansfield sviluppano la tomografia a risonanza magnetica nucleare



La Fisica Medica attuale si articola su tre branche principali

Diagnostica per immagini

⇩

Raggi X – TC
Campi magnetici – onde e.m.
Ultrasuoni

Radioterapia

⇩

Linac
Ciclotroni/sincrotroni
Sorgenti radioattive sigillate

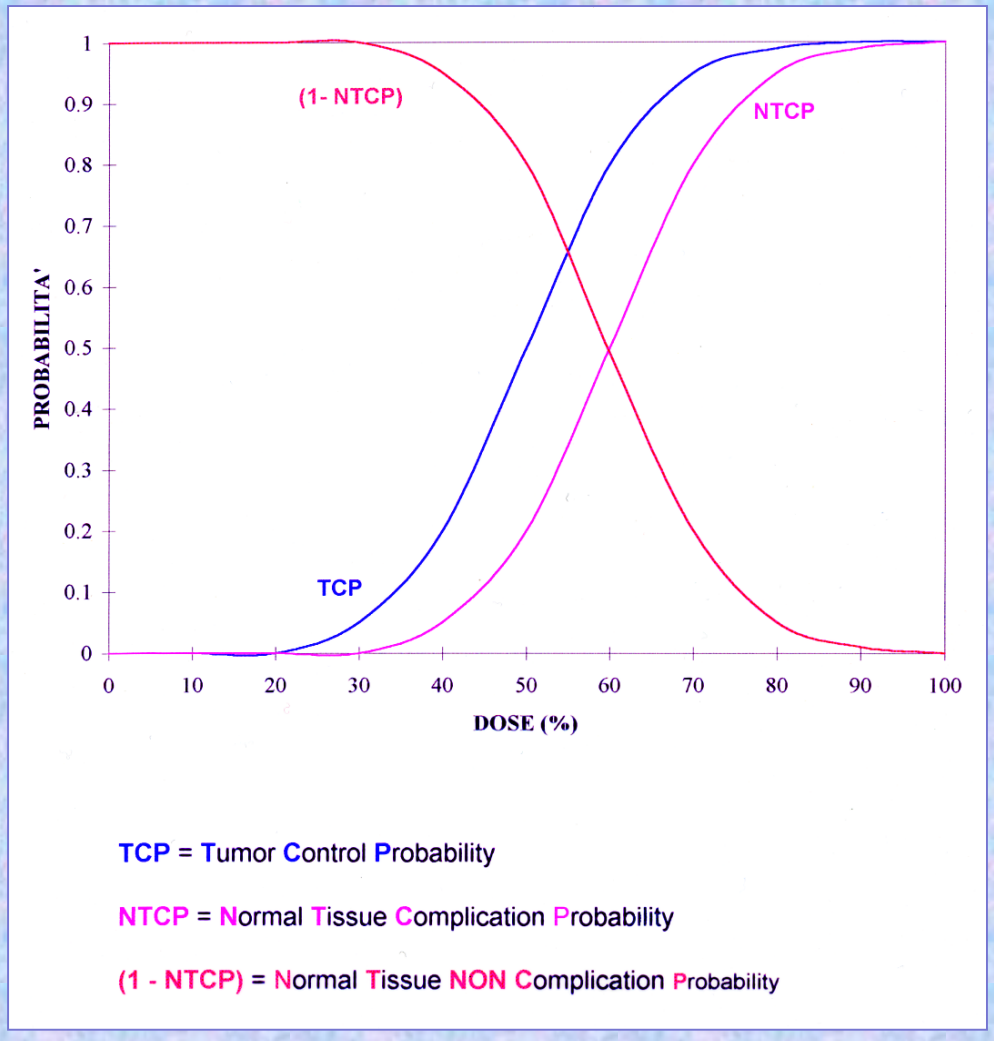
Medicina Nucleare

⇩

Sorgenti radioattive non sigillate:
Scintigrafia – PET
Radioterapia metabolica/recettoriale

Sistemi informatici per la gestione delle apparecchiature e per l'ottimizzazione delle tecniche di imaging/radioterapia

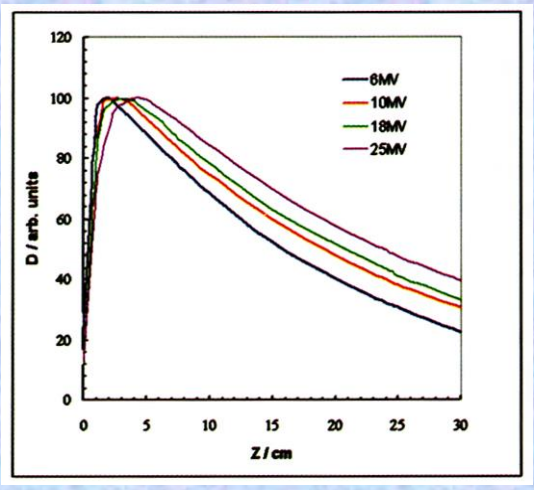
Gli scopi della radioterapia oncologica

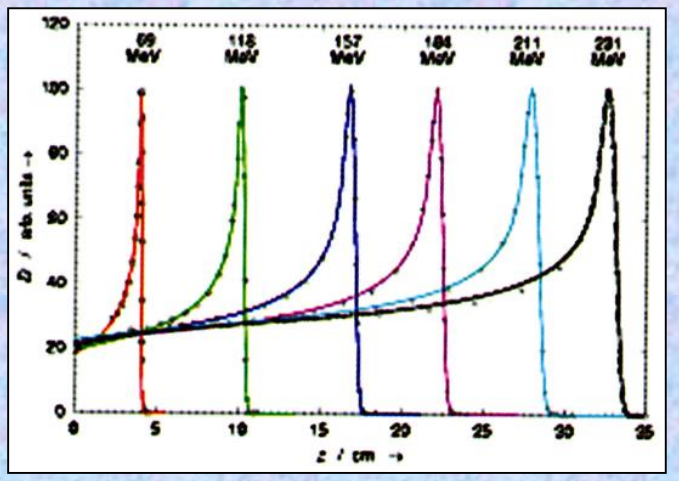


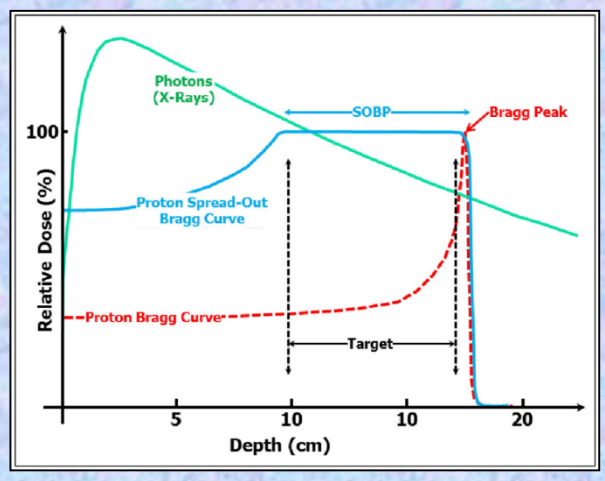
- migliorare il controllo locale
- ridurre gli effetti collaterali
- risparmiare gli organi a rischio
- ridurre il rischio di un secondo tumore radioindotto

Come è possibile raggiungere questi scopi ?

- migliorando le tecniche di imaging per la diagnosi e la pianificazione del trattamento
- aumentando la dose somministrata al tumore
- aumentando la “selettività spaziale” della dose rilasciata
- aumentando l’efficacia biologica della dose somministrata al “bersaglio”







RX: 6 – 25 MV

Protoni: 69 – 231 MeV

SOBP

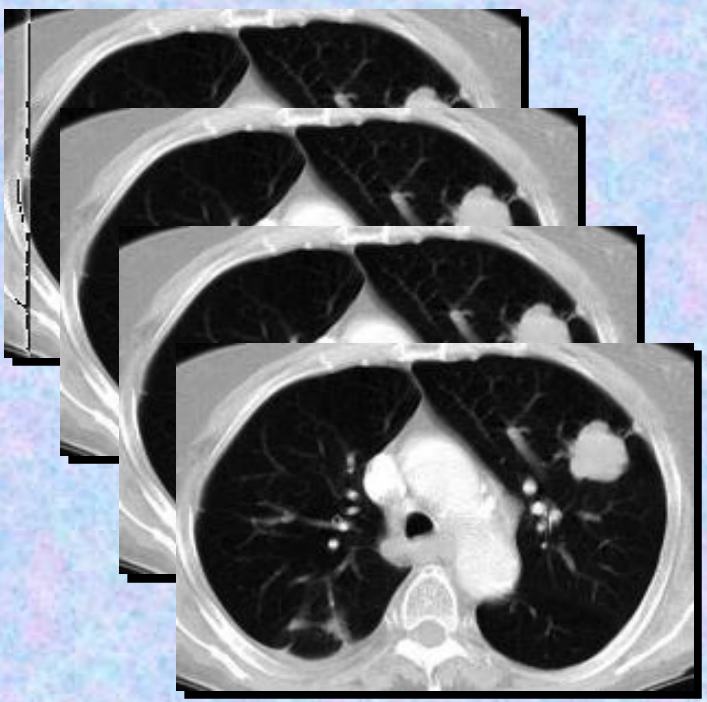
Efficacia Biologica Relativa (EBR)

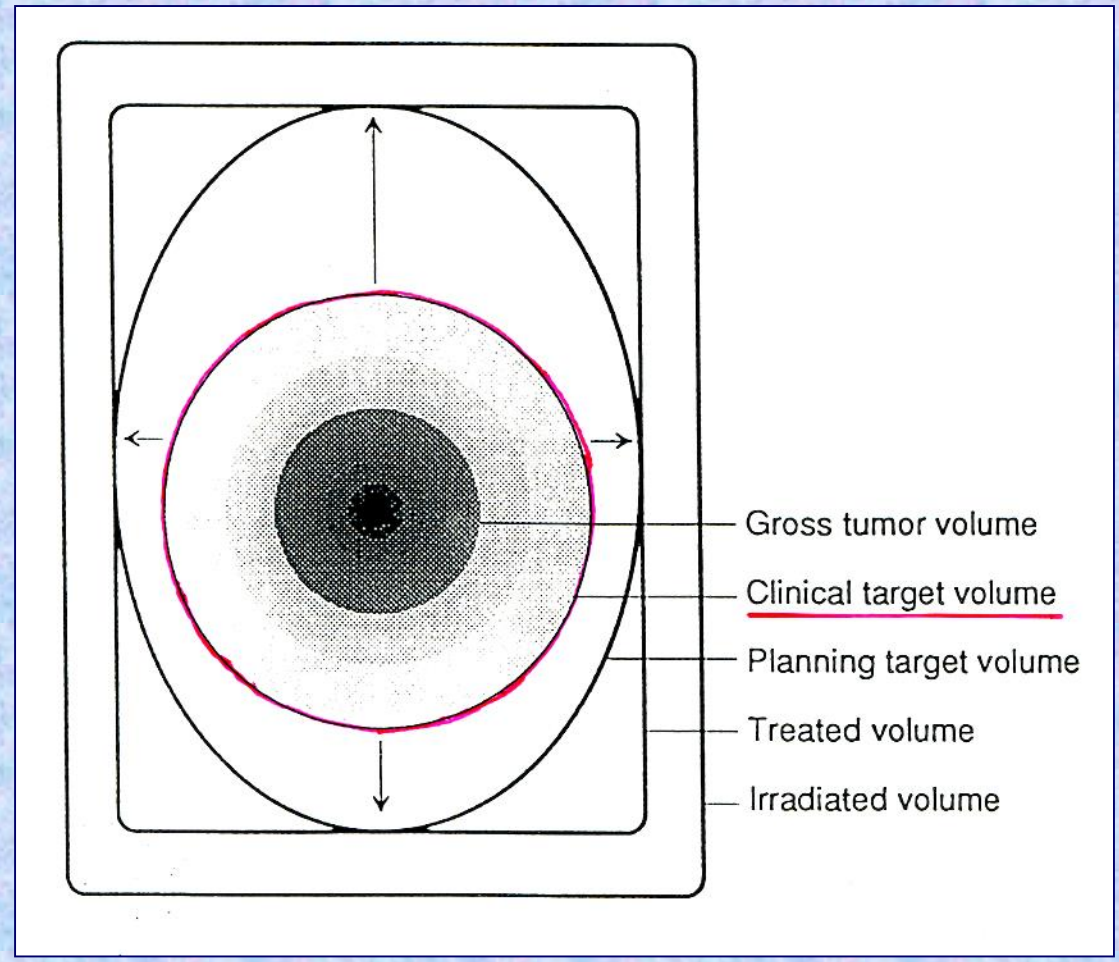
A parità di dose al "bersaglio" alcune radiazioni sono più "efficaci" di altre

Effetto di rinforzo dell'ossigeno (OER)

I tumori poco vascolarizzati, e quindi poco ossigenati, sono scarsamente sensibili alle radiazioni "tradizionali", come quelle prodotte dagli acceleratori lineari, mentre sono sensibili a "nuovi tipi" di radiazioni, come le particelle adroniche

I volumi tumorali secondo l'ICRU





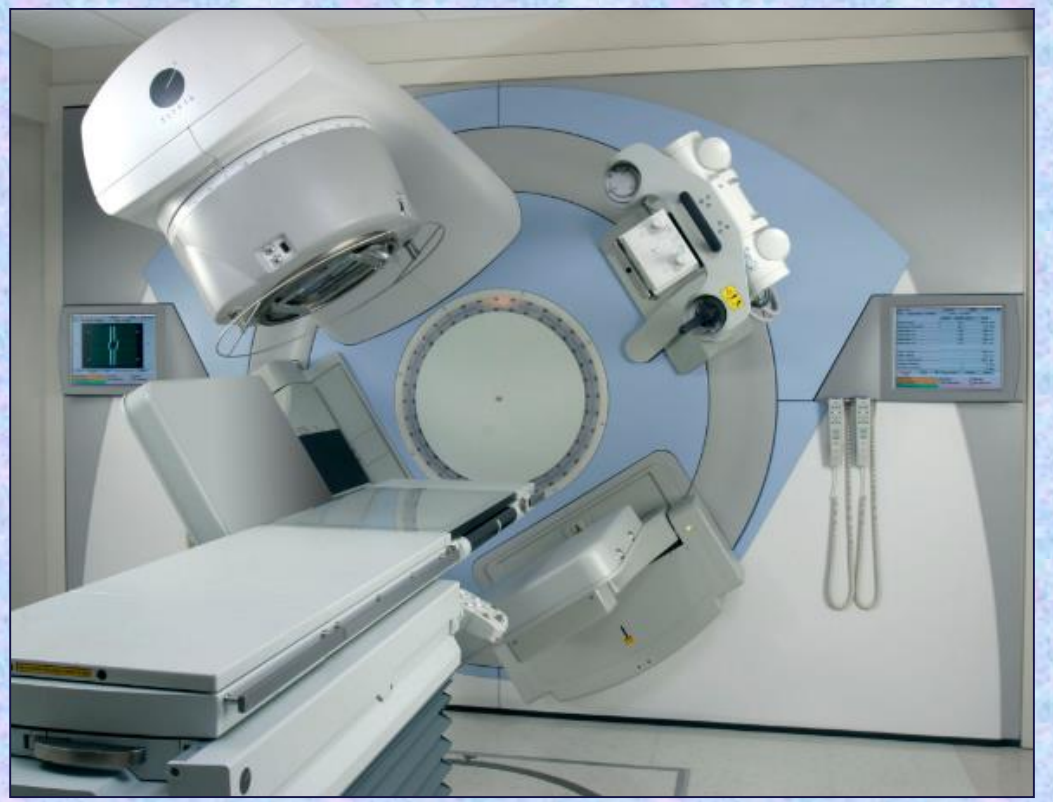
Anni ’60: unità per telecobaltoterapia
Picker Jupiter Jr (esemplare installato alla fine degli anni ’50)

Attività della sorgente:
3000 Ci (111 TBq)

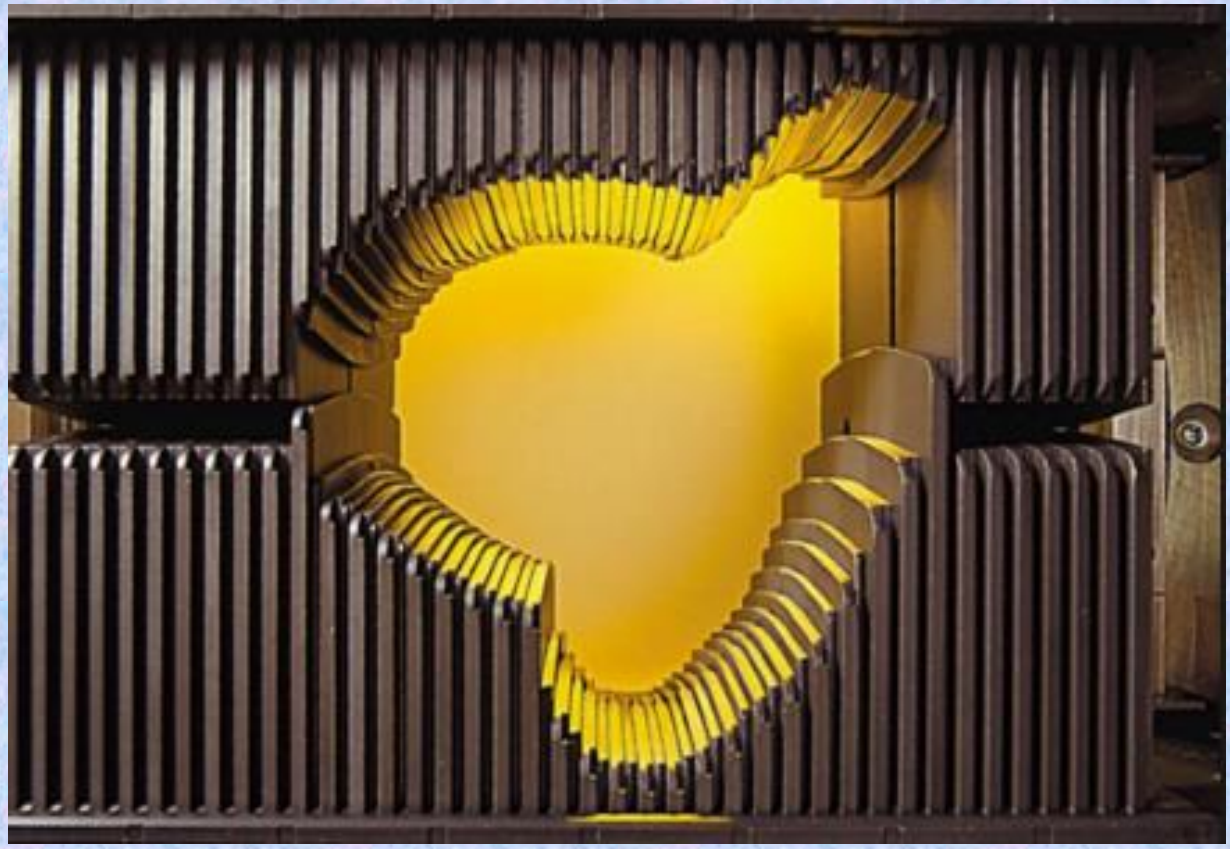
<u>Anni ’60</u>: betatrone *Asklepitron* Brown-Boveri (elettroni: 12 ÷ 32 MeV – RX: 32 MV)

I primi esemplari di questo acceleratore furono installati all’inizio degli anni ‘60 a Torino, Milano e Firenze

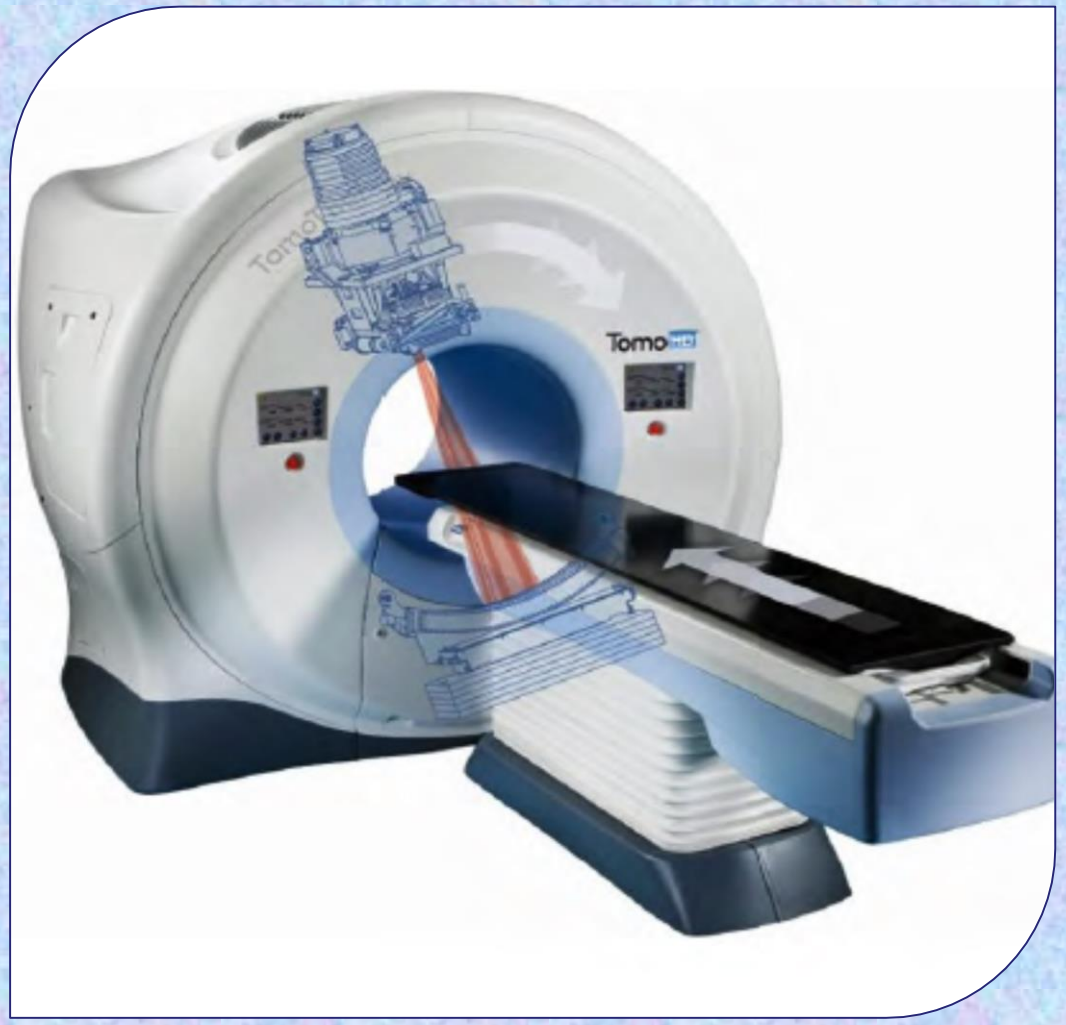
I linac più recenti, che incorporano dispositivi per il controllo *real time* della posizione del *target*, vengono utilizzati per trattamenti IGRT

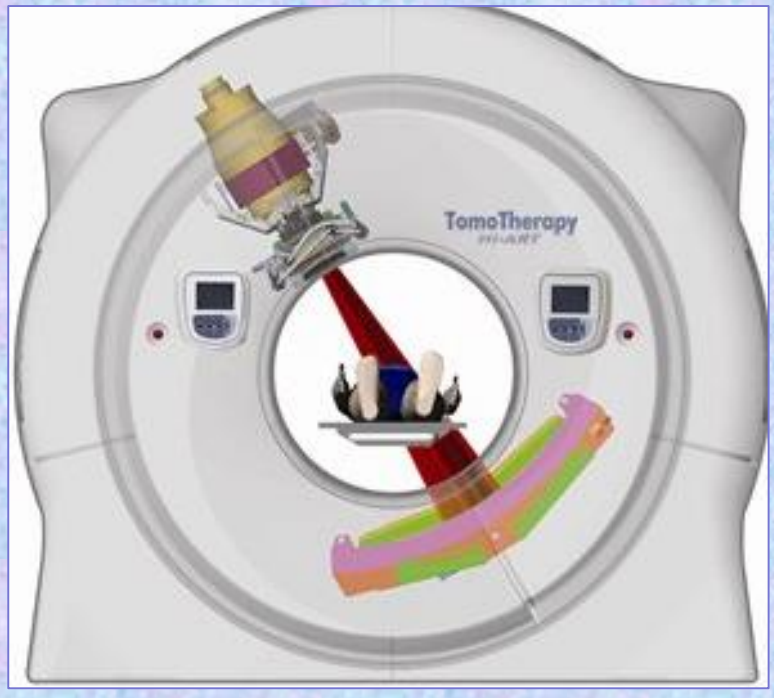


Collimatore *multileaf* (multilamellare)
utilizzato per trattamenti con tecniche IMRT e IGRT

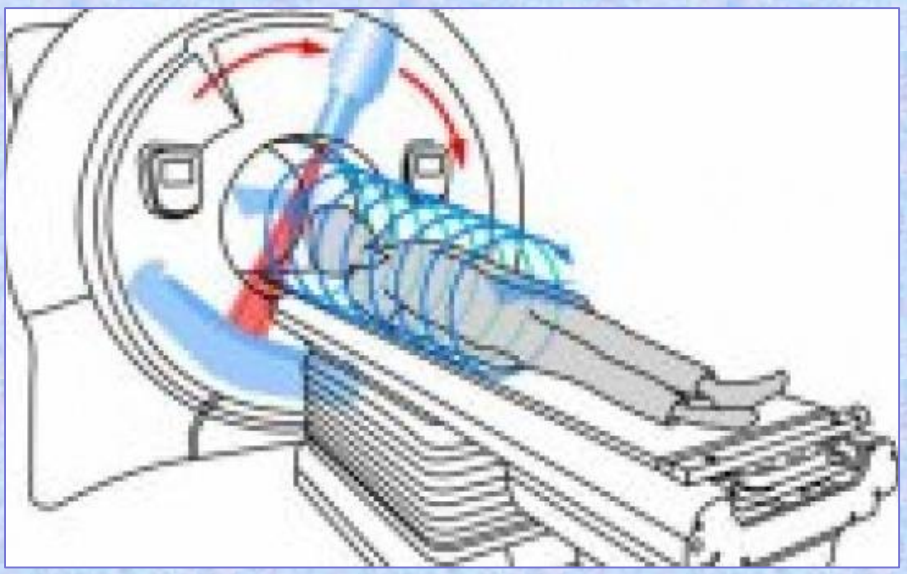


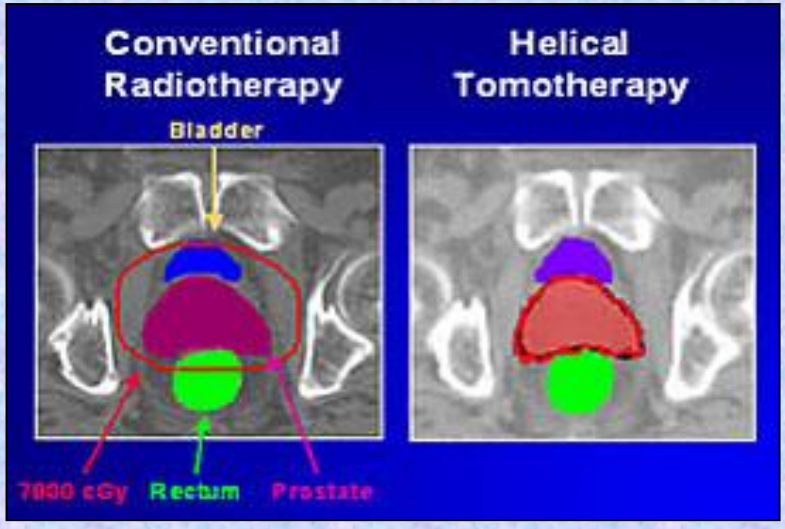
Tomoterapia: associa un linac da 6 MV con un sistema di TC



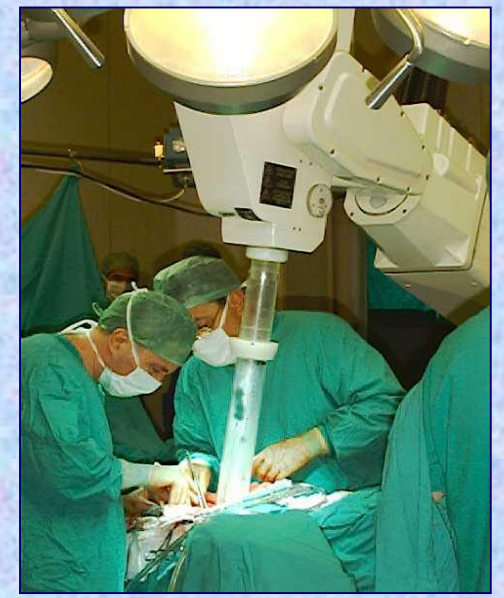


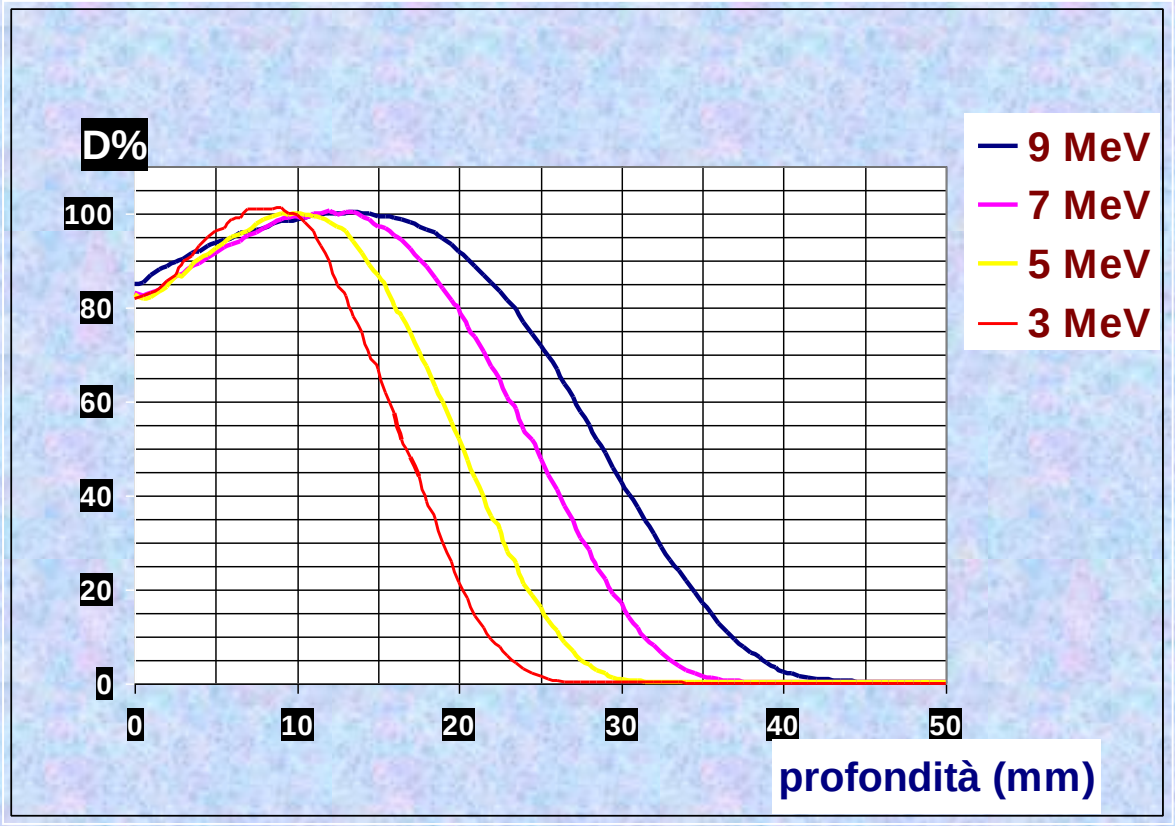
Tomoterapia:
il processo e il risultato





Radioterapia intraoperatoria (IORT)

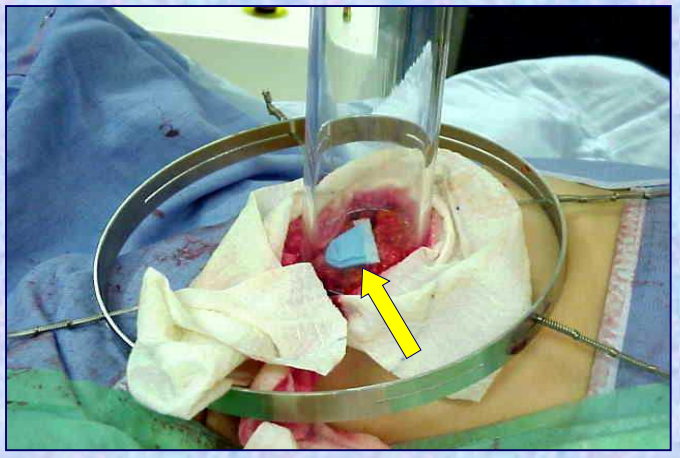




Radioterapia intraoperatoria con linac mobile all'IEO

Il linac in c.o.

La dosimetria in vivo

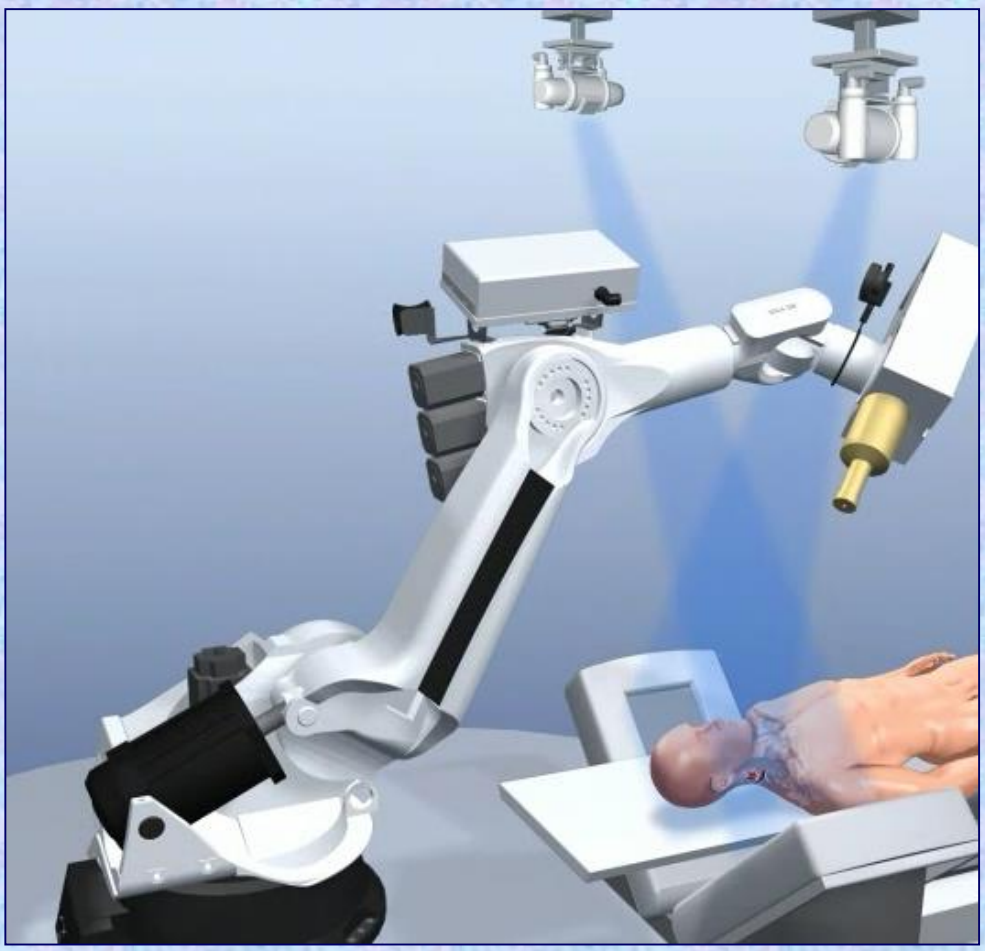


La dosimetria

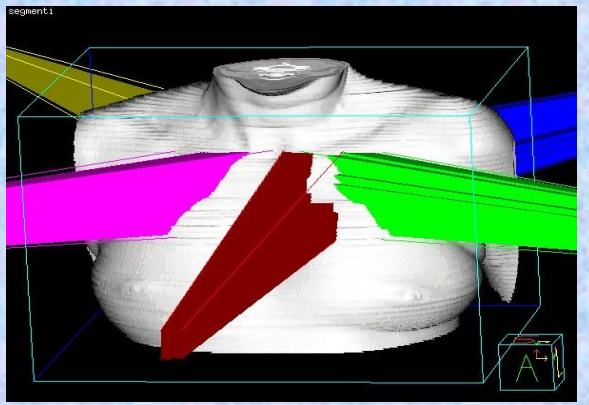
Radiochirurgia con cyberknife®

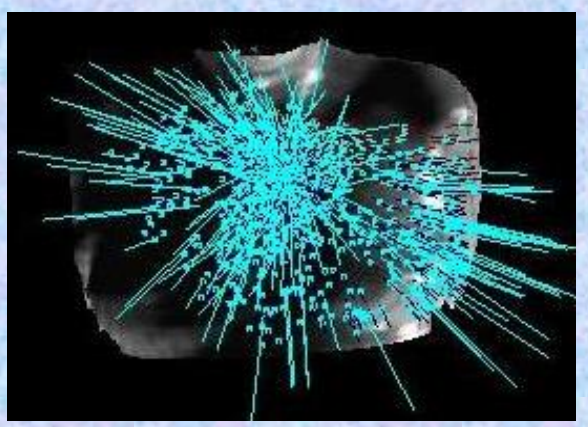
<u>4 componenti principali</u>

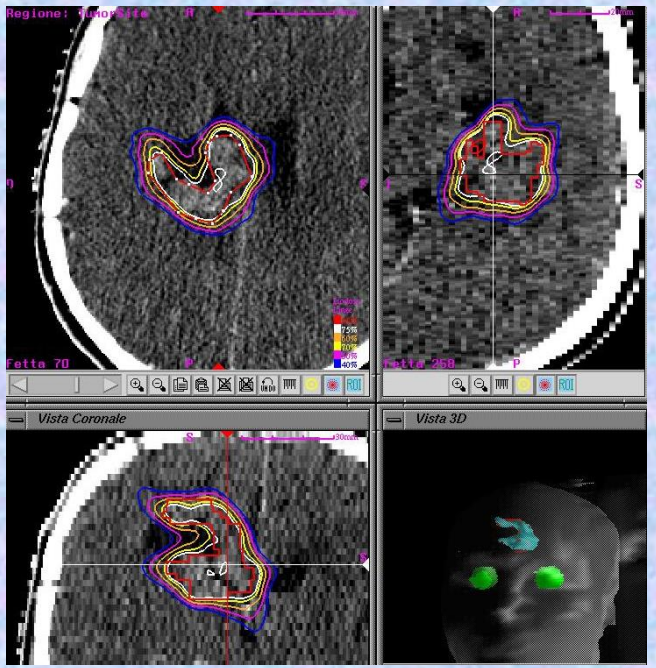
- Robot a 6 gradi di libertà
- Linac compatto a 6 MV
- Sistema di verifica RX
- TPS dedicato



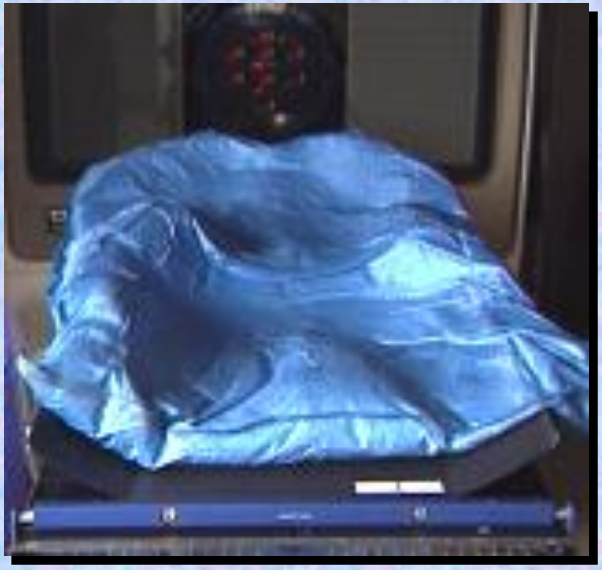
- **Il robot a 6 gradi di libertà consente di pianificare trattamenti non isocentrici e/o non complanari. Tuttavia è possibile adottare anche strategie convenzionali a un isocentro o a più isocentri**



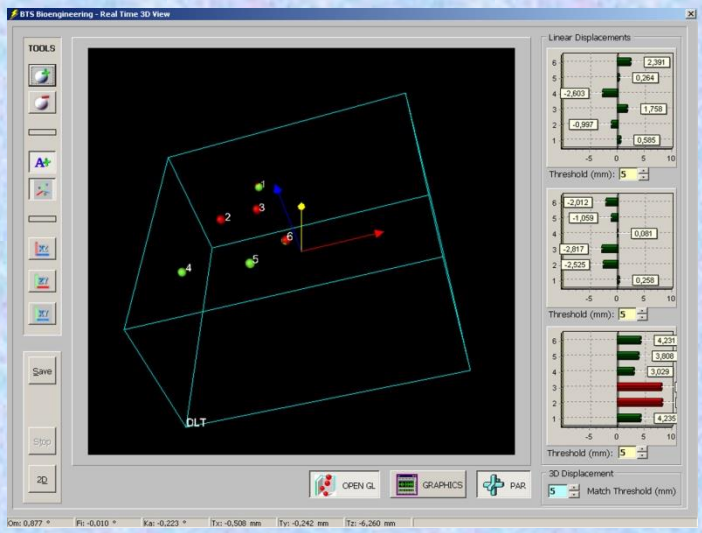


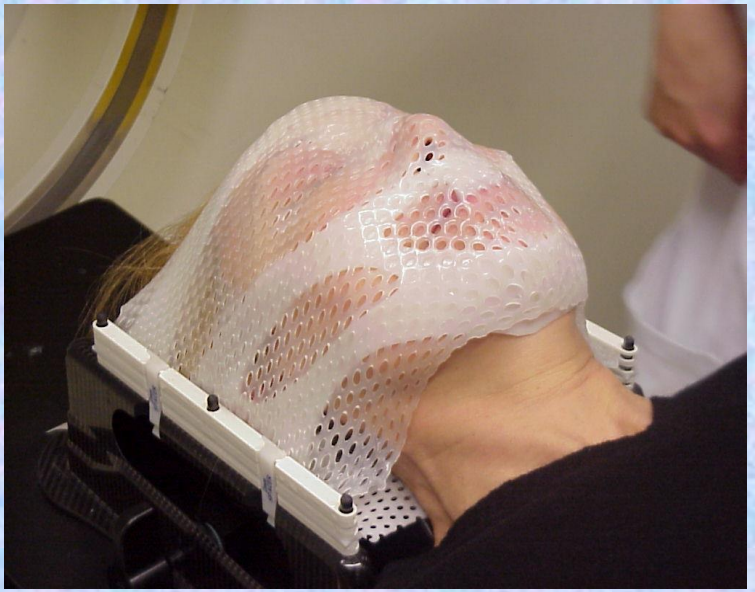


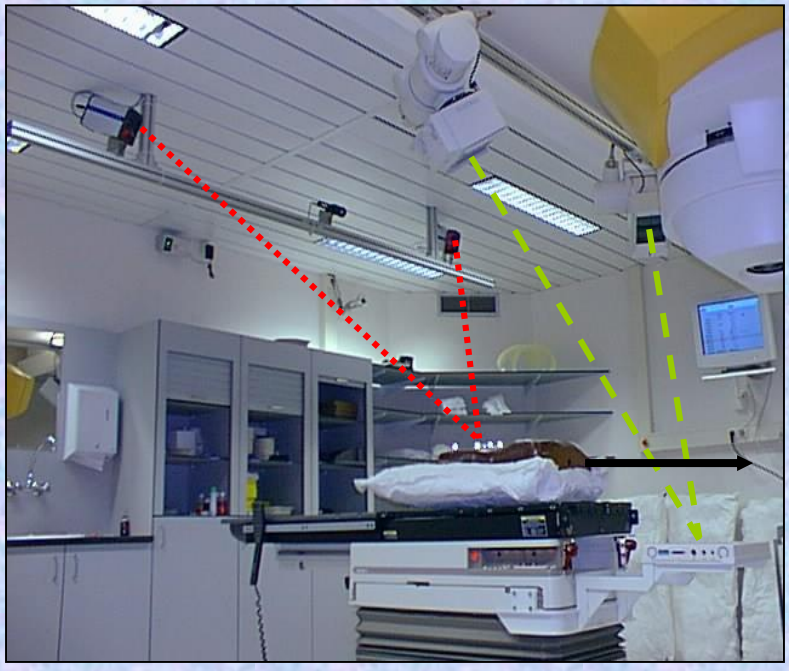
Curve di isodose:
10-100, 10



Dispositivi di immobilizzazione e di controllo del posizionamento del paziente

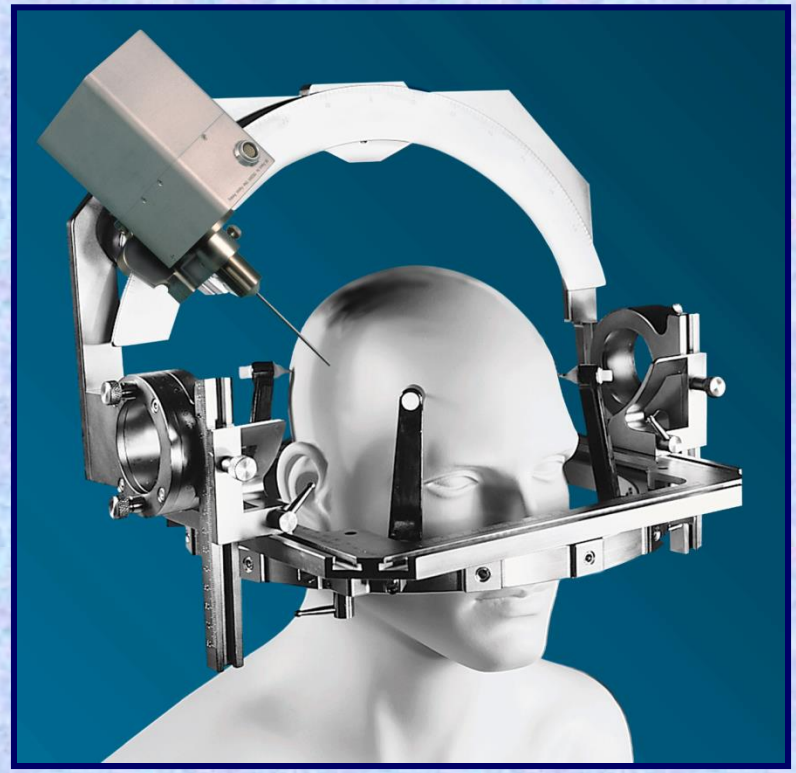






Radiochirurgia cranica con RX di bassa energia (< 50 keV)

Il PRS® (Photon Radiosurgery System)

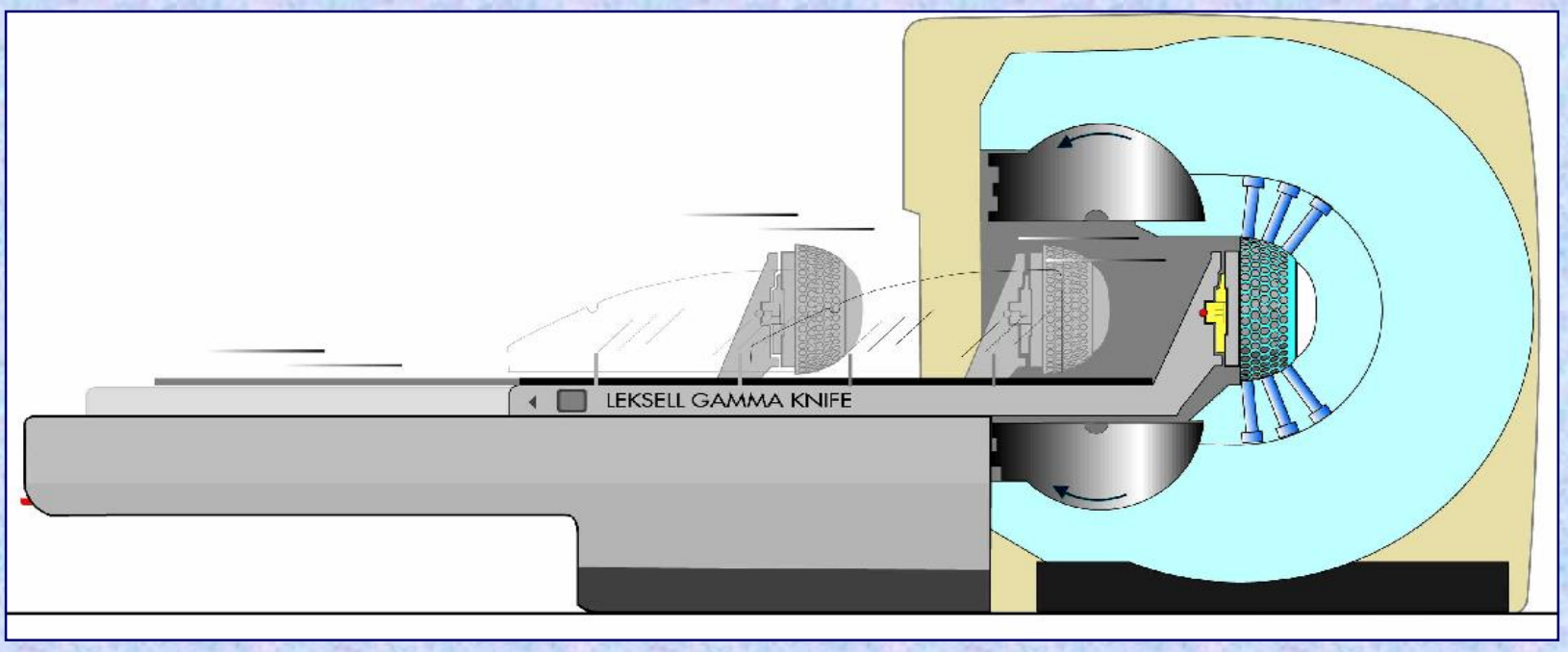


Il PRS montato su casco stereotassico

L'applicazione sul paziente

Radiochirurgia intracranica

Il Gamma Knife®



La «testata» contiene oltre 200 sorgenti di Co-60 che producono altrettanti *narrow beams* focalizzati su un «isocentro»

Le origini della Radiochirurgia?

PHYSICAL TREATMENT FOR MENTAL DISORDER. After MATTHIAS GREUTHER ca. 1600

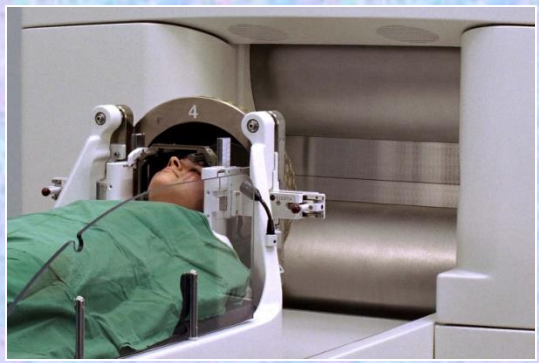
Gamma Knife - processo

- **Fissaggio Casco Stereotassico**

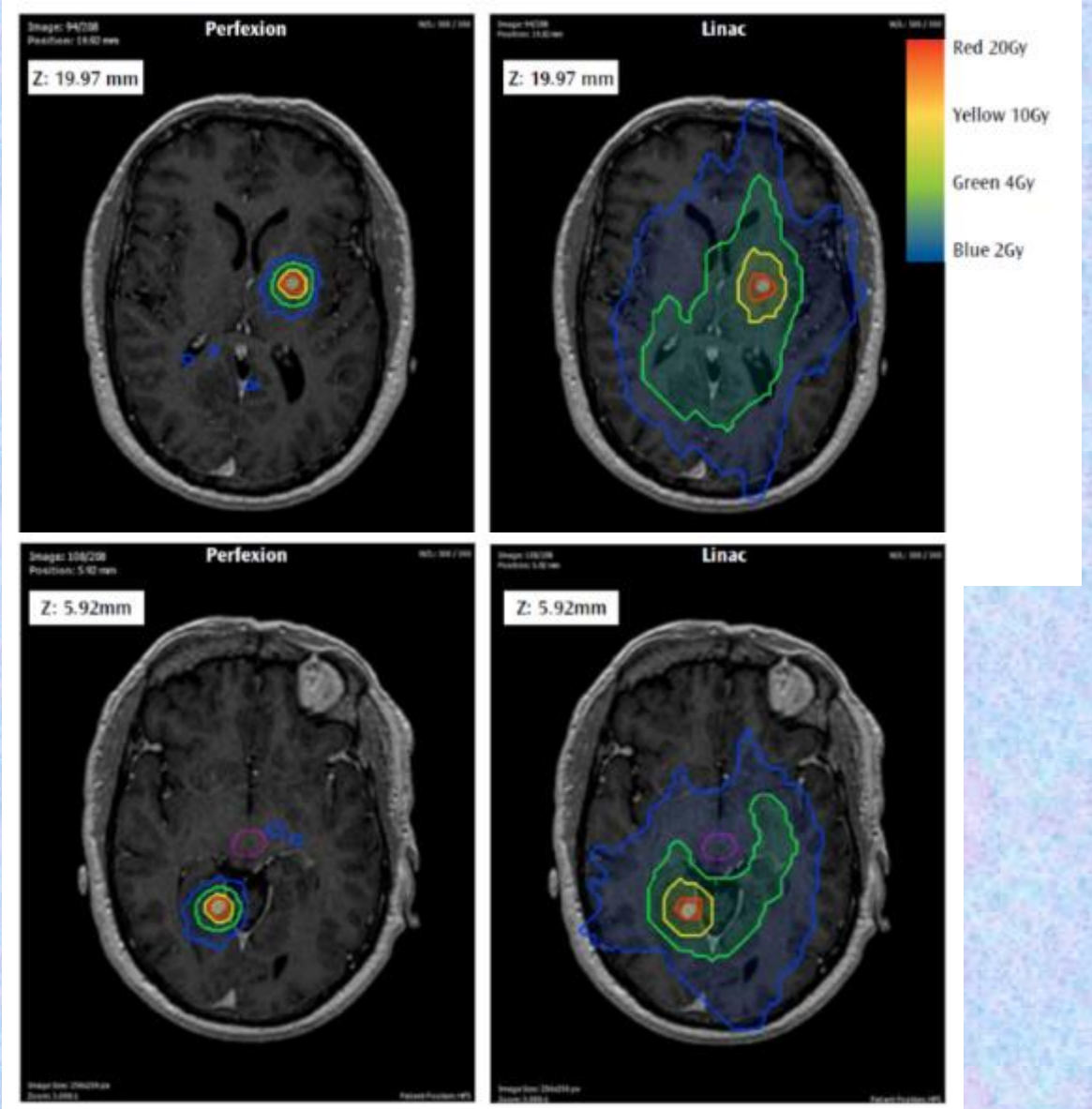
- **CT, MR Imaging**

- **Planning**

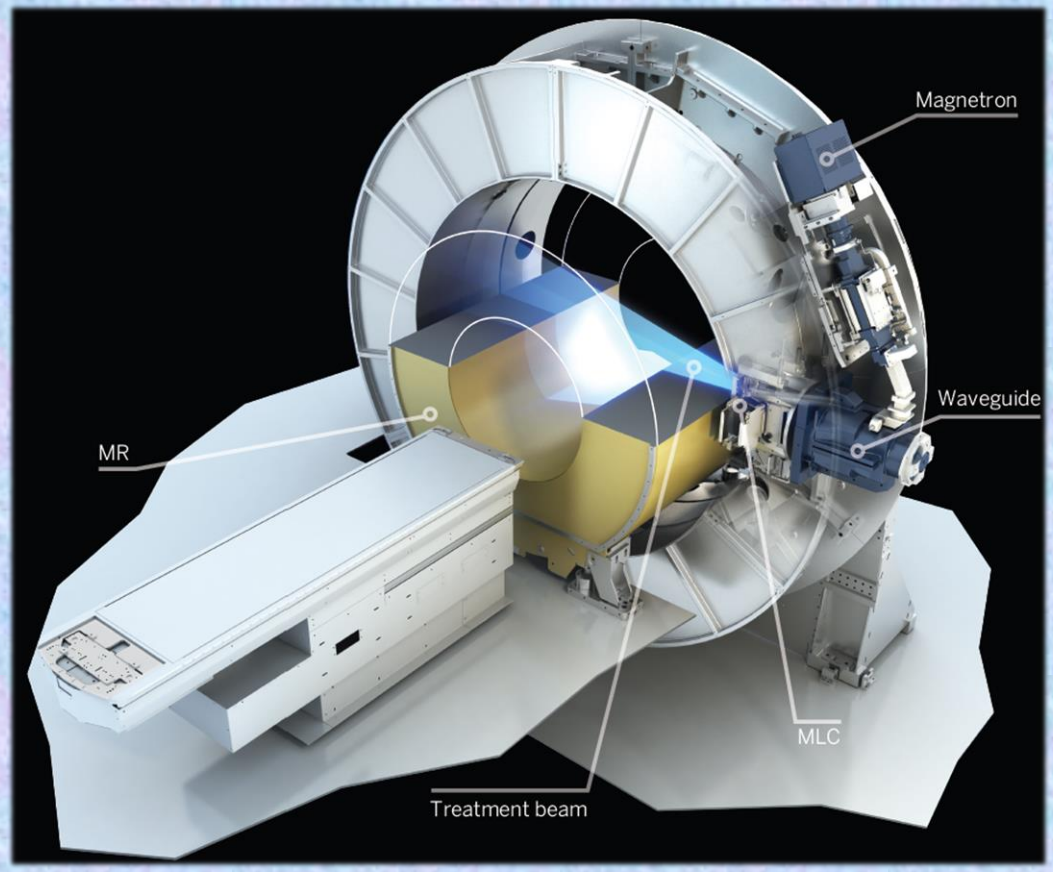
- **Trattamento**
  (in un'unica seduta)



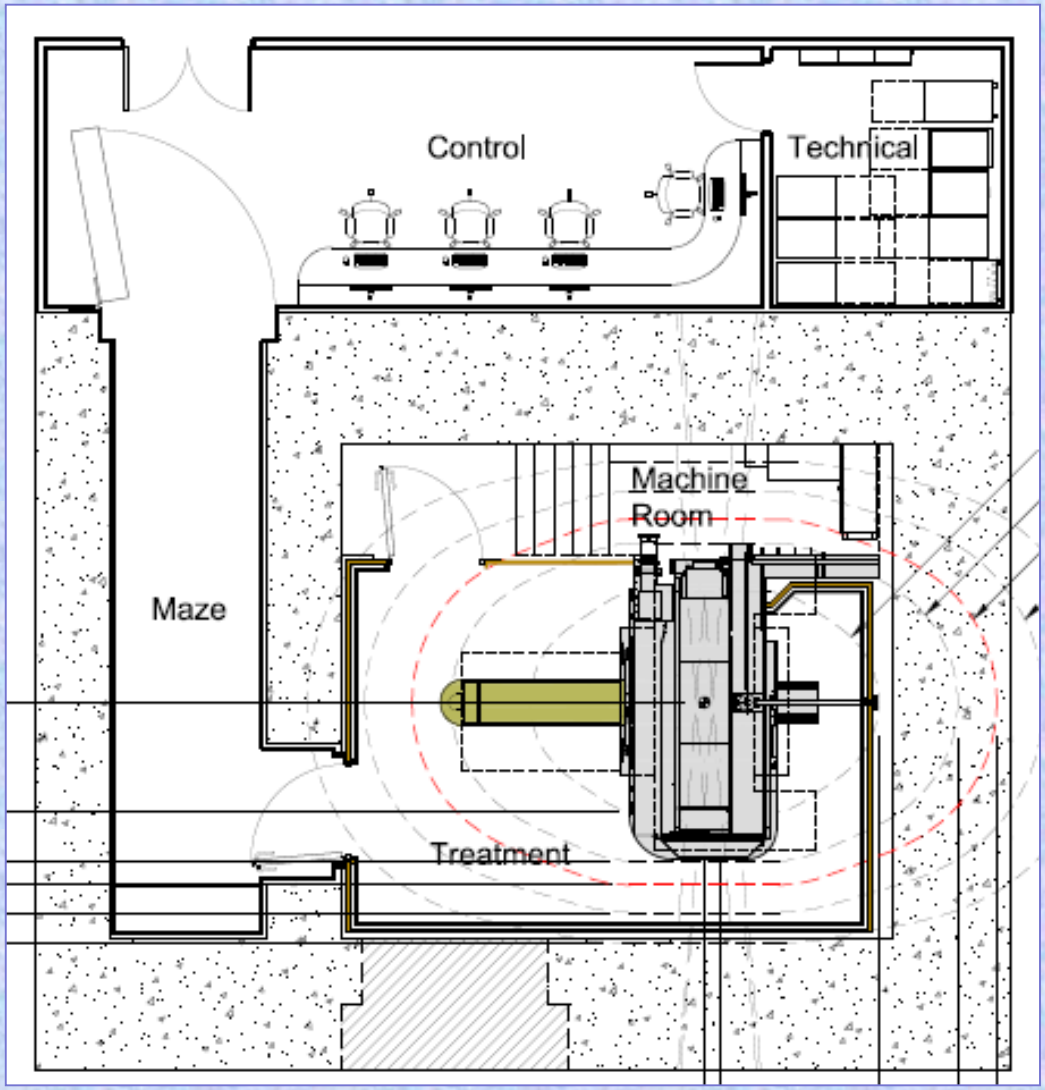
Gamma Knife vs. Linac



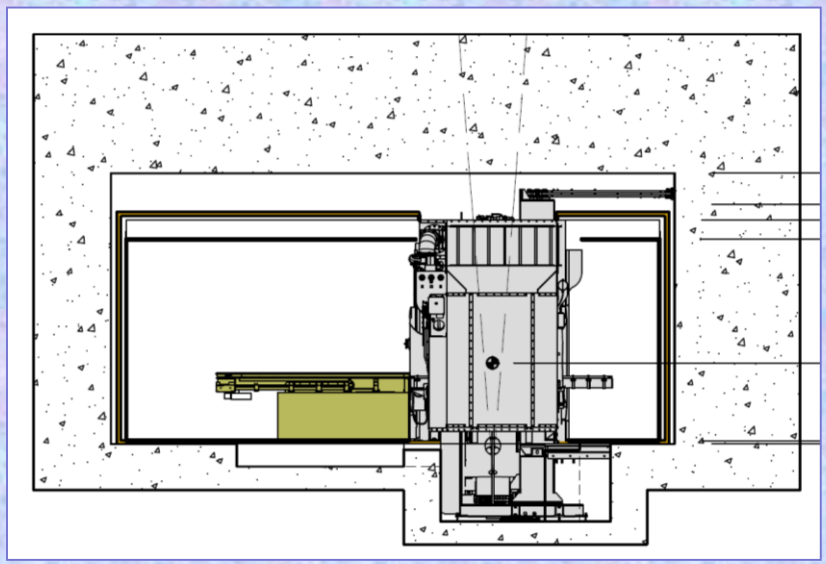
Sistema integrato per radioterapia con linac da 6 MV guidata da immagini RM (1,5 T) *



*** Prototipo non ancora disponibile commercialmente**

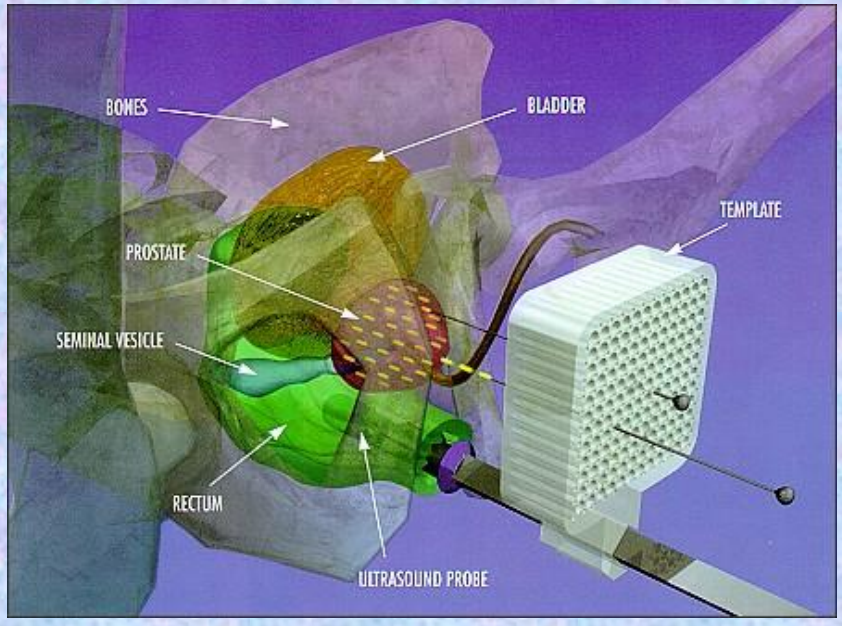


Il sistema può essere installato in un bunker «tradizionale» che deve essere integrato, al suo interno, con una gabbia di Farady

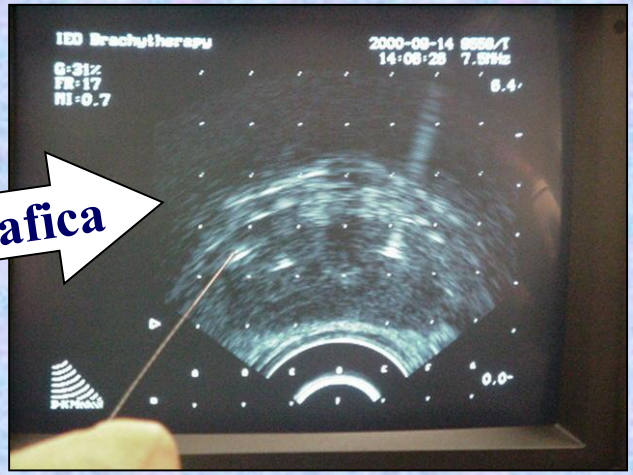


Brachiterapia remote-loading: proiettore di sorgenti di Ir-192

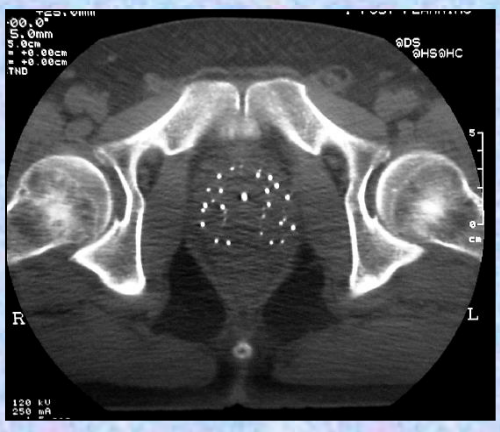
Impianto permanente eco-guidato di semi di I-125 nella prostata



guida ecografica



l'impianto



CERN/PPE/UA/eo 25 Maggio 1991

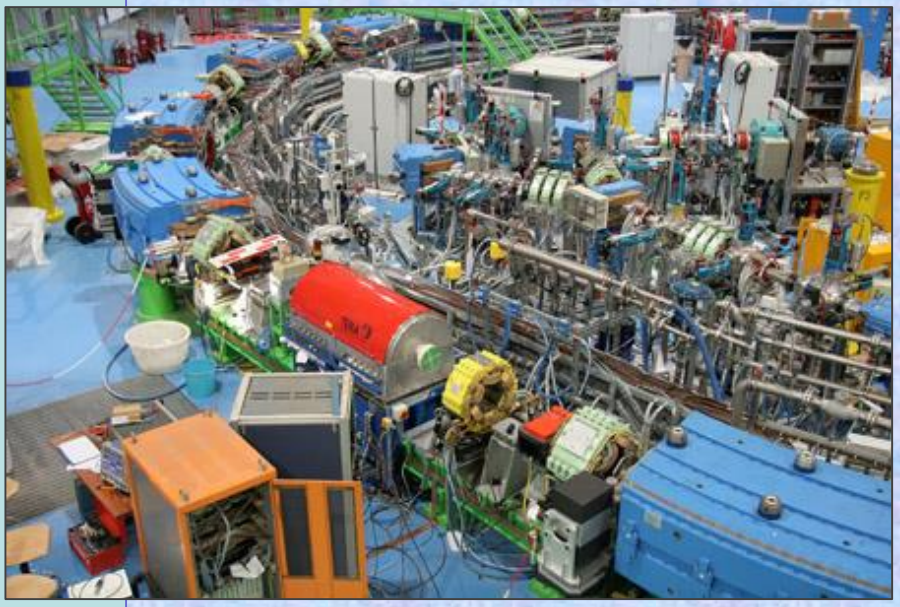
Per un Centro di Teleterapia con Adroni

Ugo Amaldi

CERN e Università di Milano

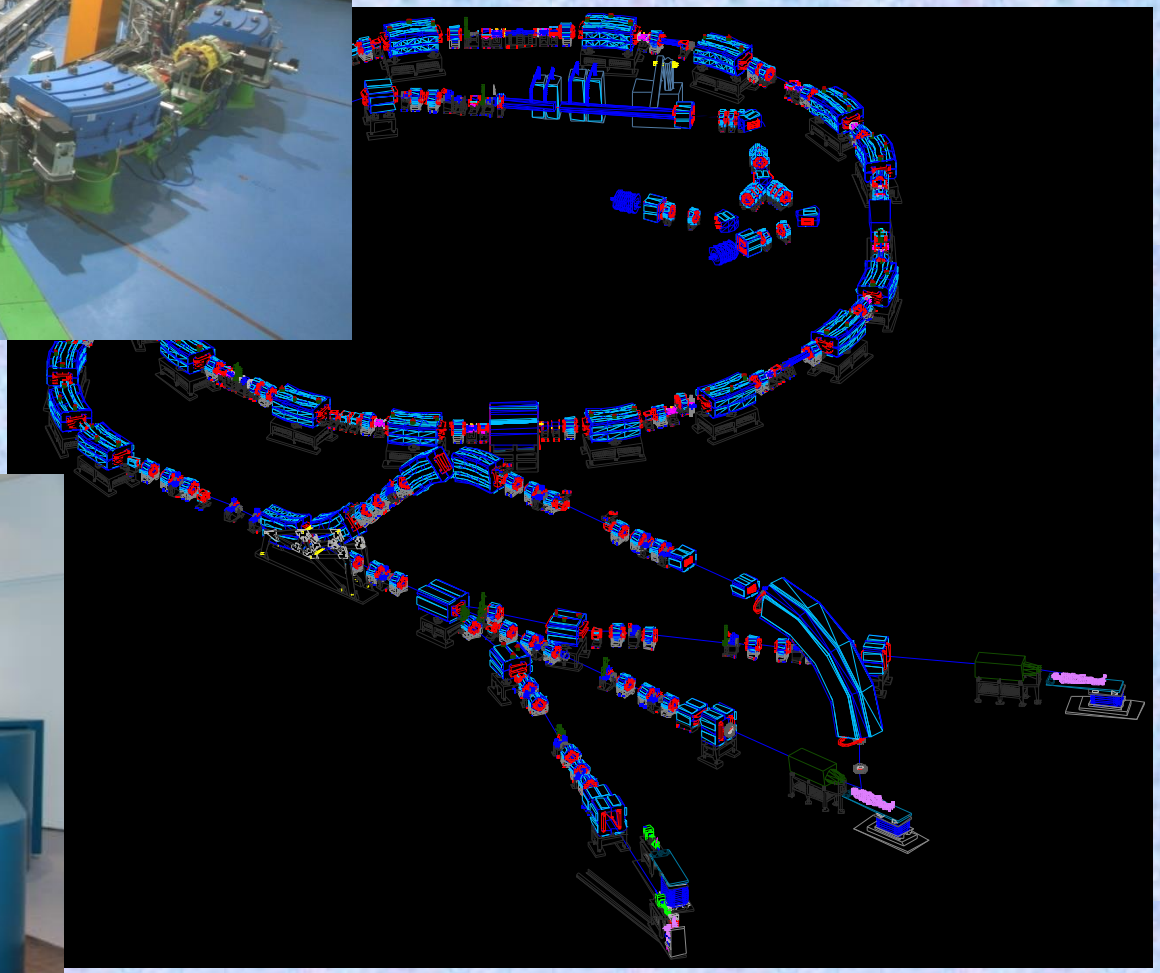
Giampiero Tosi

Ospedale di Niguarda, Servizio di Fisica Sanitaria
e Università di Milano

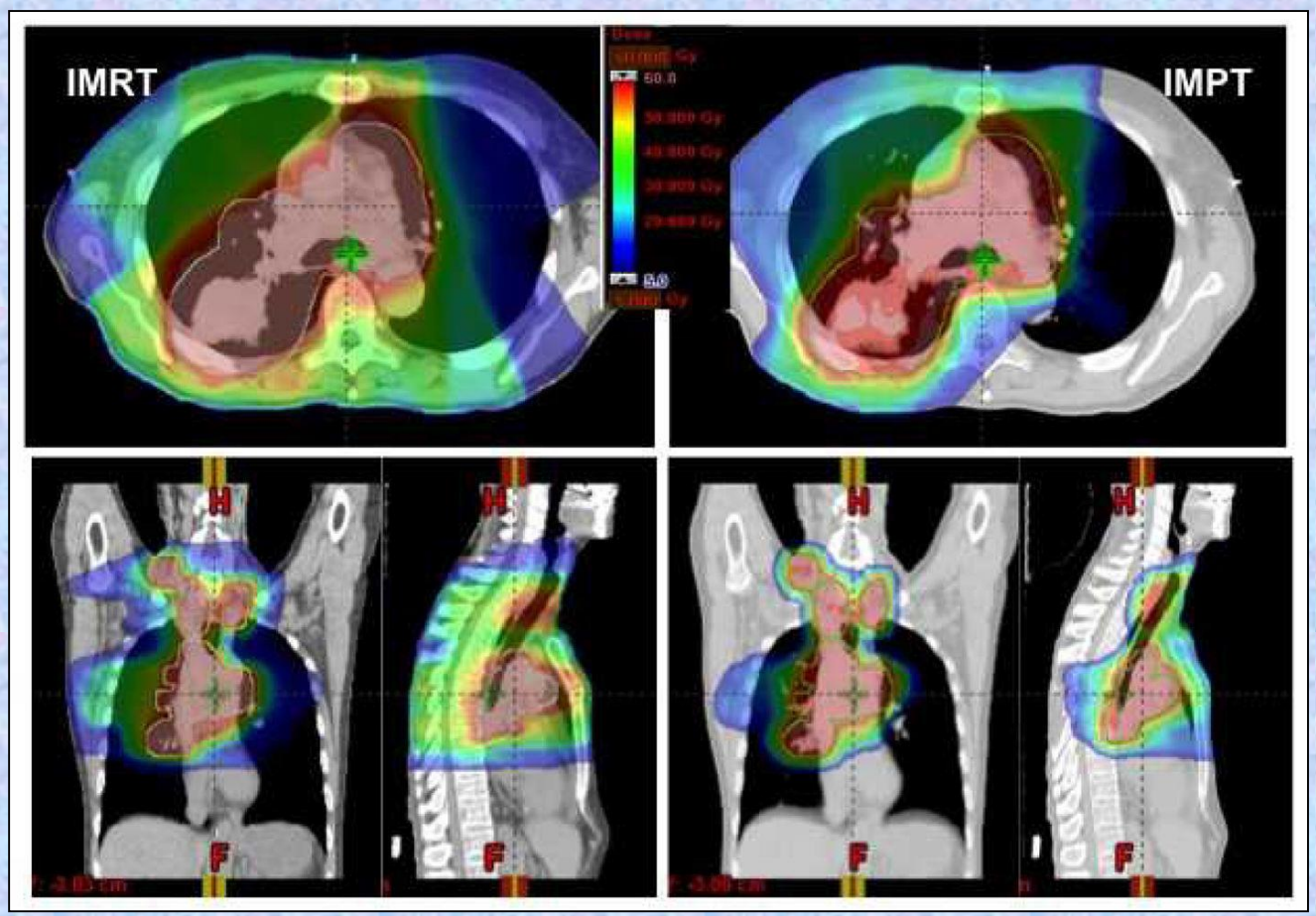


CNAO

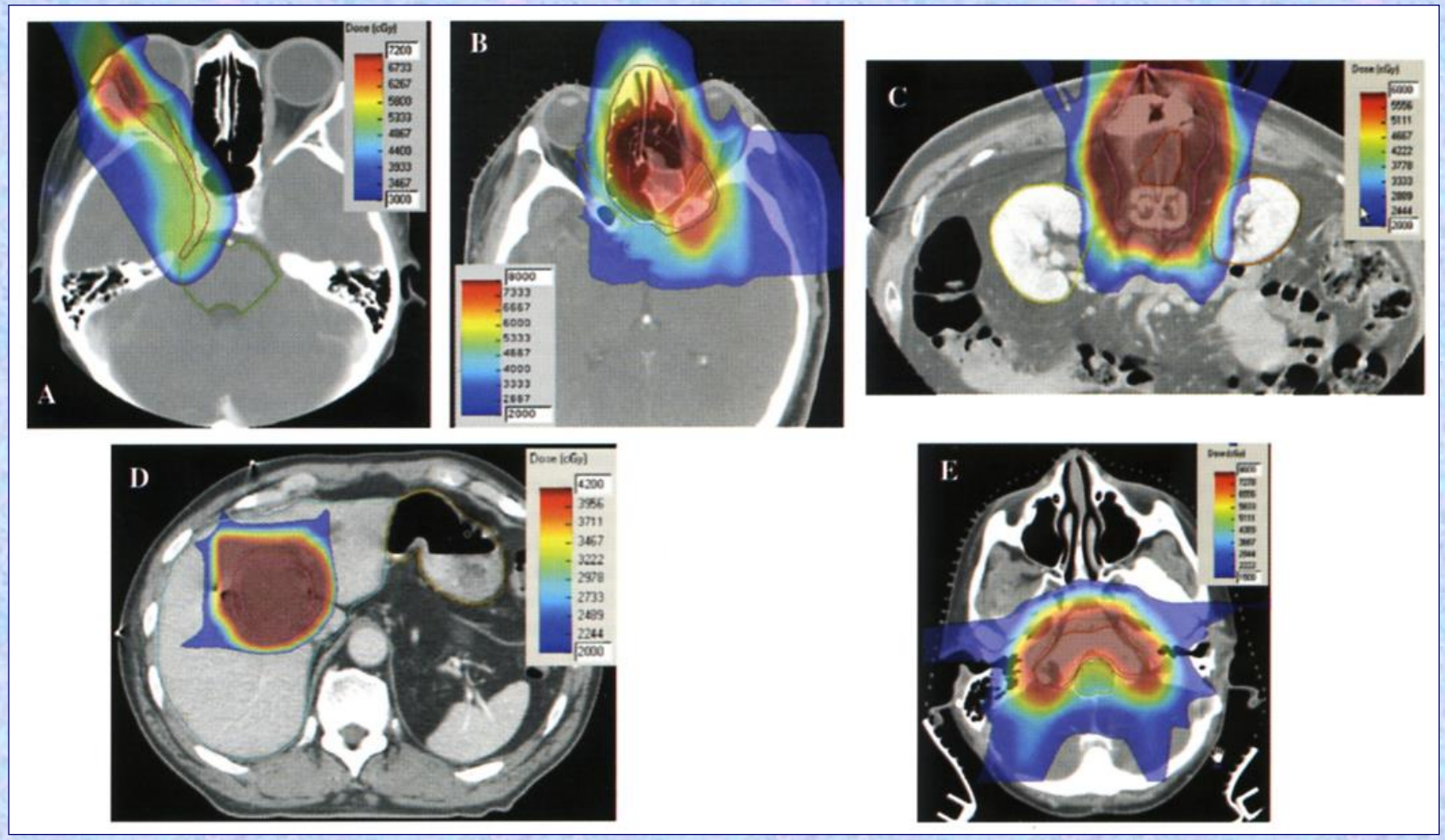
Sincrotrone



Perché l'adroterapia ?



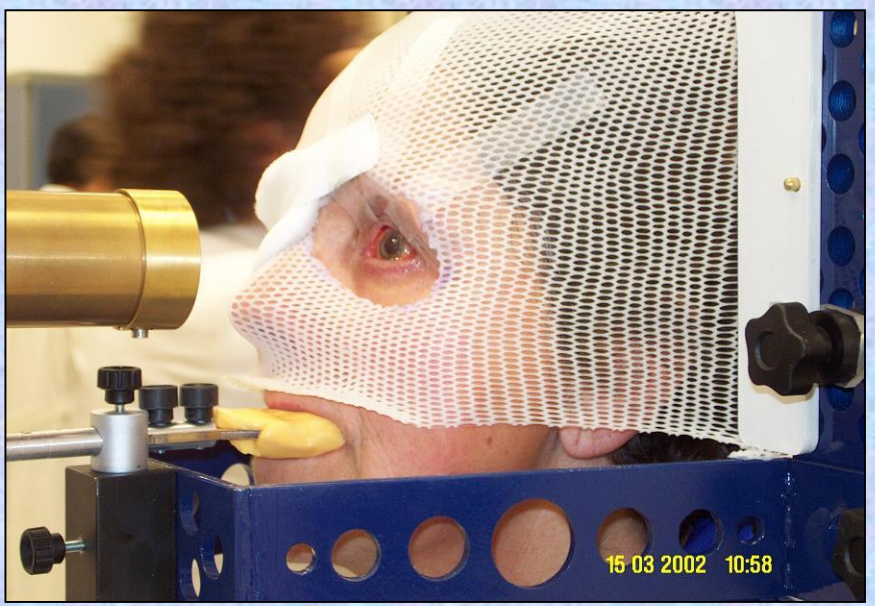
Protonterapia di tumori vari



(ghiandole lacrimali, seni paranasali, colonna lombare, fegato, base del cranio)

Protonterapia del melanoma dell'occhio – progetto Catana

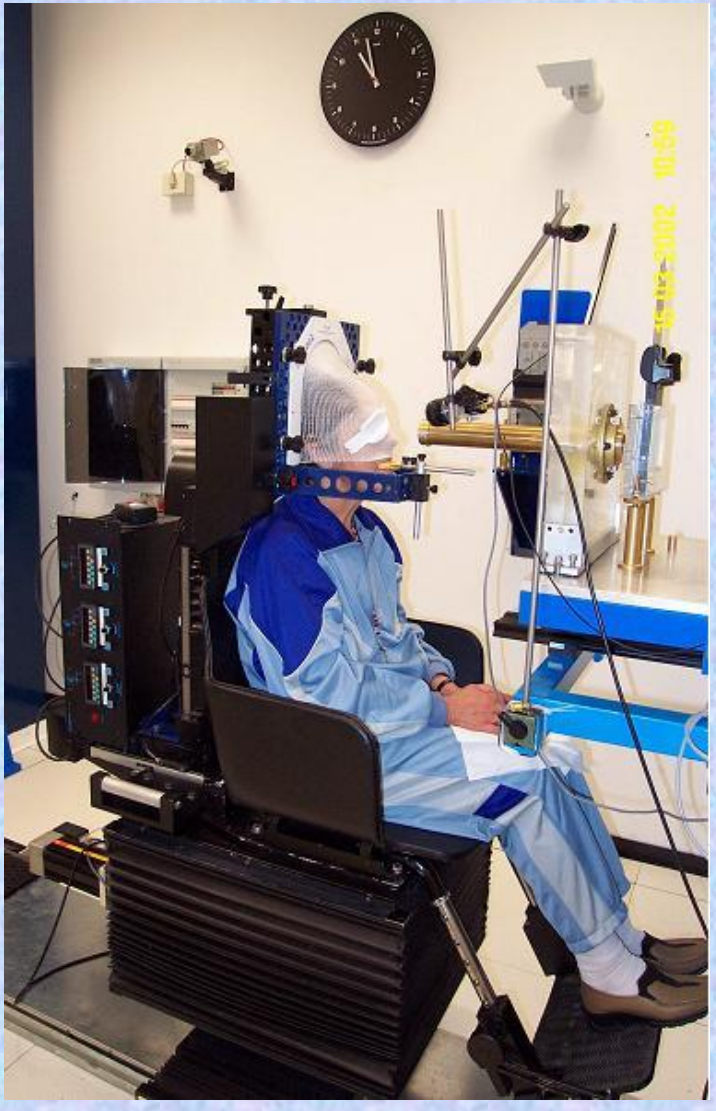
La linea completa



Il sistema di immobilizzazione

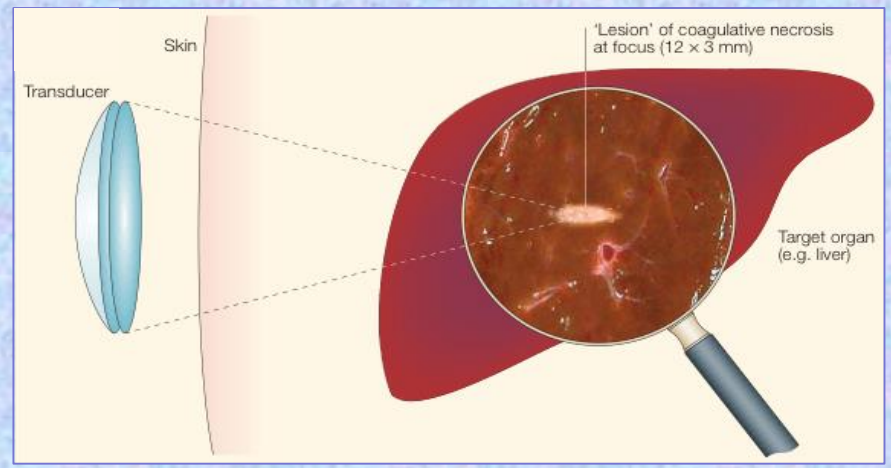
Adroterapia

Protonterapia di un melanoma dell'occhio con fascio di protoni da 62 MeV presso il LNS dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare a Catania, nell'ambito del progetto CATANA



Un campo di ricerca e applicazione importante per la Fisica Medica: trattamento dei tumori con ultrasuoni focalizzati ad alta intensità

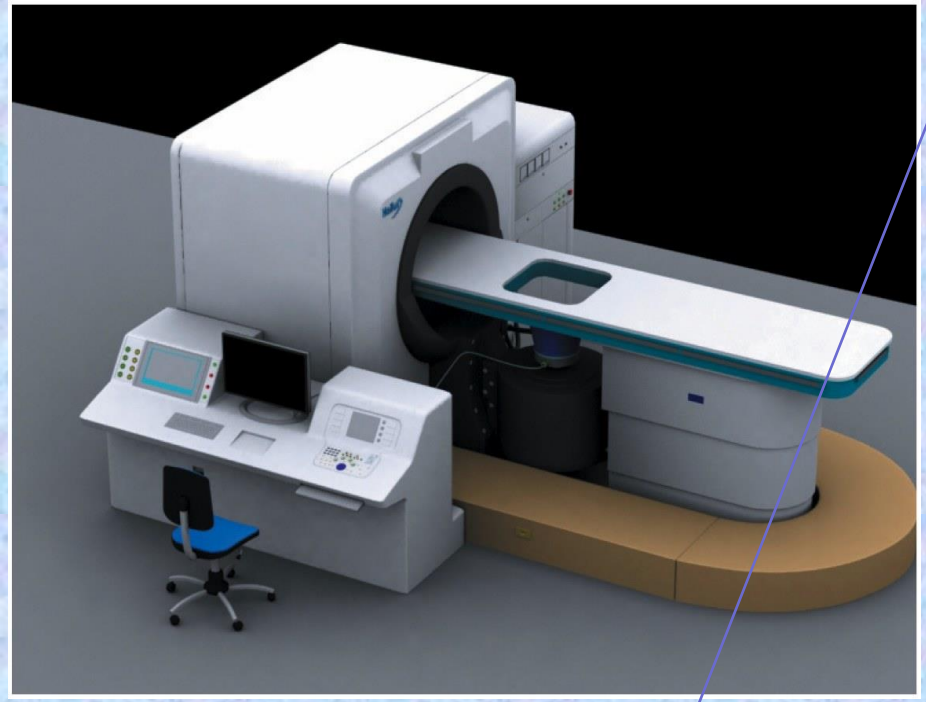
- **Tecnica minimamente invasiva**
- **Ultrasuoni focalizzati ("effetto lente")**
- **Ablazione del tumore in situ, con risparmio dei tessuti circostanti**
- **Monitoraggio in tempo reale con US o MRI**
- **Trattamento singolo, di durata elevata (60 min per una lesione di 3 cm)**
- **Riduzione degli effetti collaterali (scottatura cutanea in pochi casi)**

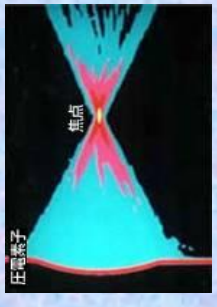


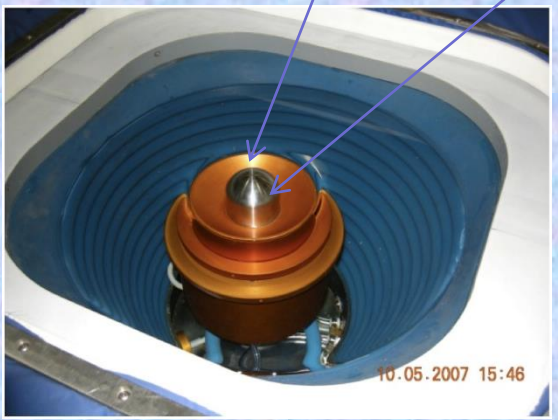
Kennedy JE, *Nature Reviews Cancer* (2005)

Il primo sistema HIFU a guida MR: Insightec 2000

- Il sistema HIFU è contenuto in un lettino a corredo (opzionale) della RM da 1.5 e 3 T
- Una consolle addizionale consente la pianificazione, la verifica e l'esecuzione dei trattamenti
- Esistono circa 80 esemplari installati nel mondo, di cui circa 15 in Europa (ca. 1000 k€ senza la RM!)
- 2004 l'approvazione della FDA per il trattamento dei leyomiomi (fibromi uterini) e 2007 trattamento palliativo delle metastasi ossee
- Larga sperimentazione a livello mondiale (tra cui Charité di Berlino e St. Mary's di Londra) su altri distretti anatomici.







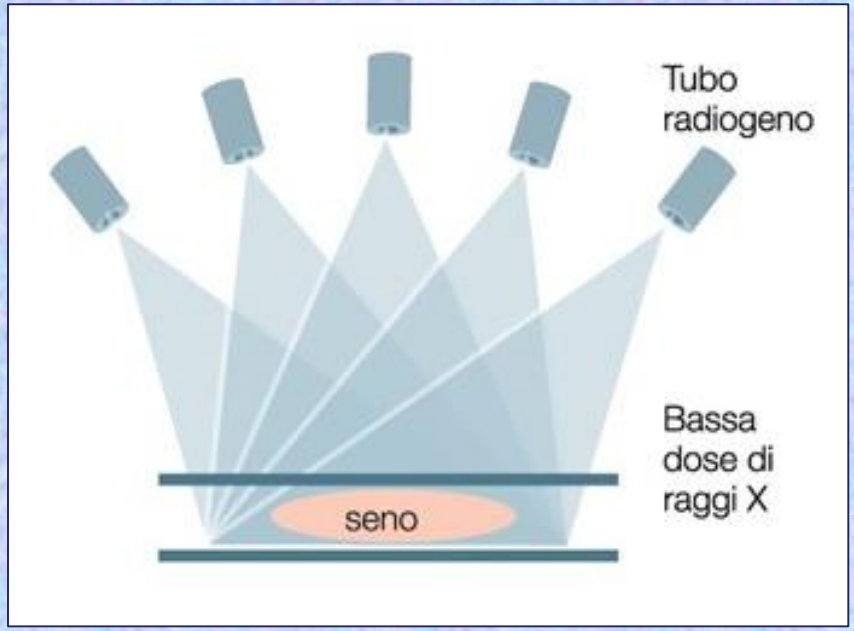
Trasduttore per trattamento HIFU

- Frequenza fissa: 1 MHz
- Potenza: 50 – 400 W
- Dimensioni del fuoco: 8 mm x 2 mm
- Intensità nel fuoco: 5-15 kW/cm^2
- Diversi trasduttori con distanza focale fissa: 90 -134 mm

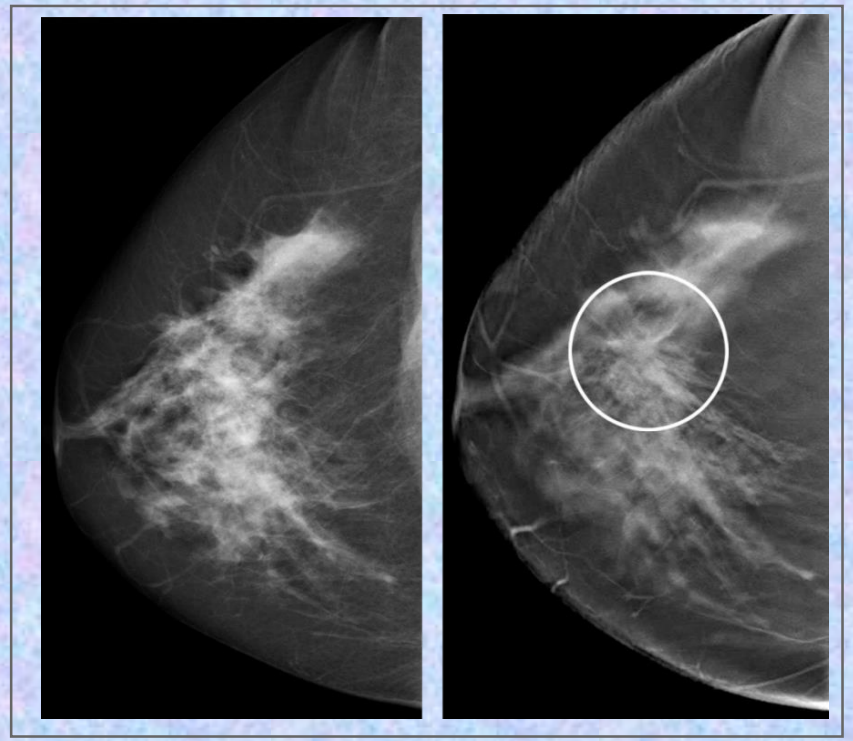
Trasduttore per imaging US

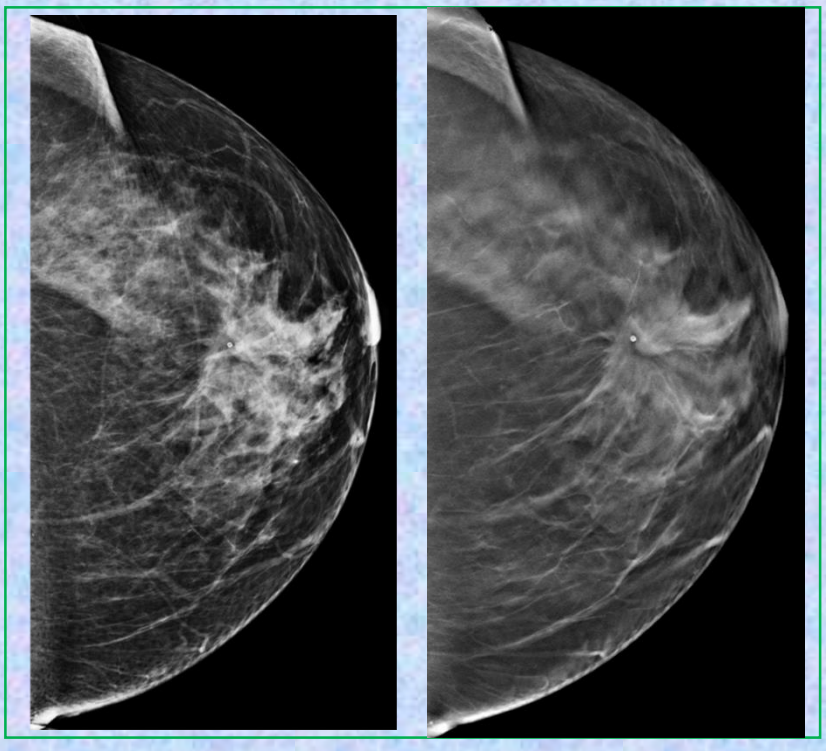
- Posizione coassiale, frequenza: 1-8 MHz
- Intensità nel fuoco: 0.1 W/cm^2
- Real time B-Mode
- Color, power Doppler e harmonic imaging

Tomosintesi



- Il tubo si muove lungo un arco
- Rivelatore flat-panel (diretto/indiretto)
- Rivelatore può essere statico o ruotare per un certo angolo seguendo il movimento del tubo
- Proiezioni multiple della mammella a differenti angoli
- Set di immagini a bassa dose
- Volume ricostruito e visualizzato su piani paralleli al piano del rivelatore in intervalli dell'ordine del mm.



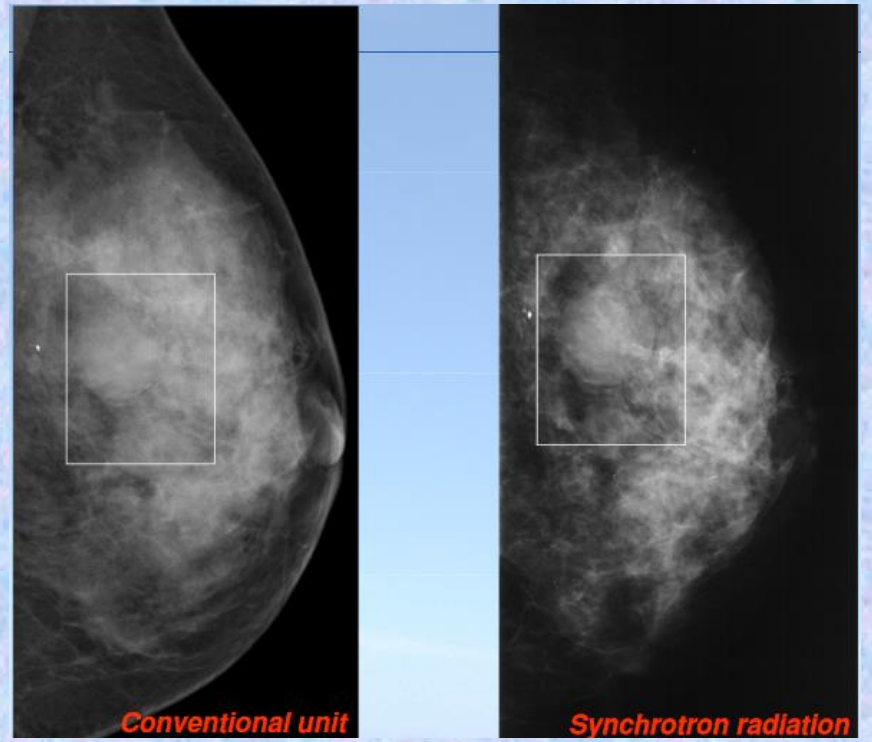


Radiographics. 2015 Jul-Aug;35(4):975-90

Digital Breast Tomosynthesis in the Diagnostic Setting: Indications and Clinical Applications. Peppard HR[1], Nicholson BE[1], Rochman CM[1], Merchant JK[1], Mayo RC 3rd[1], Harvey JA[1].

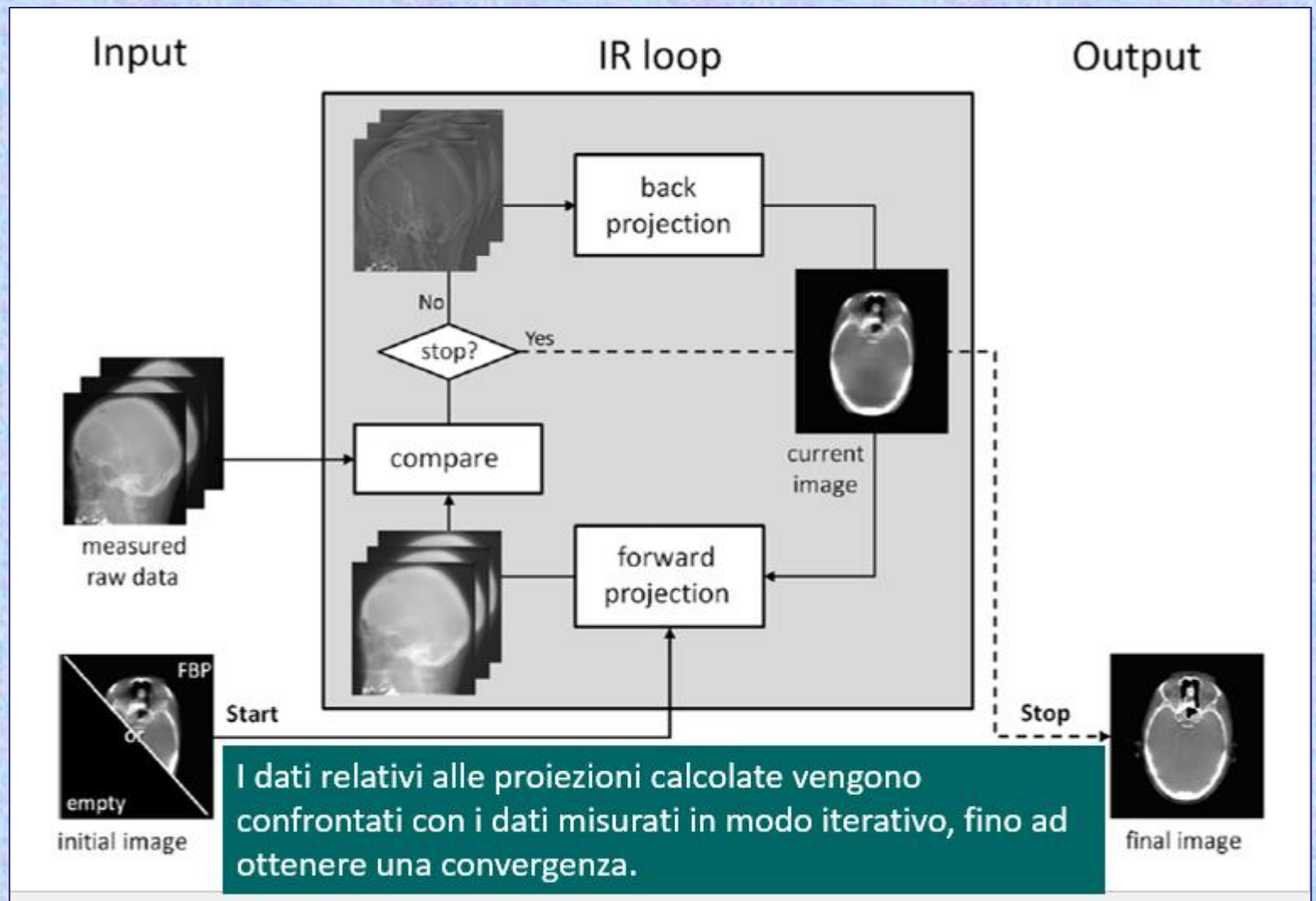
Progetto di ricerca SYRMA-CT
Tomografia mammaria con luce di sincrotrone
(INFN – Elettra – Ospedali Riuniti di Trieste)

Il lettino porta-paziente realizzato per la sperimentazione della mammografia con luce di sincrotrone



Confronto mammografia tradizionale / mammografia con luce di sincrotrone

Algoritmi di ricostruzione iterativi

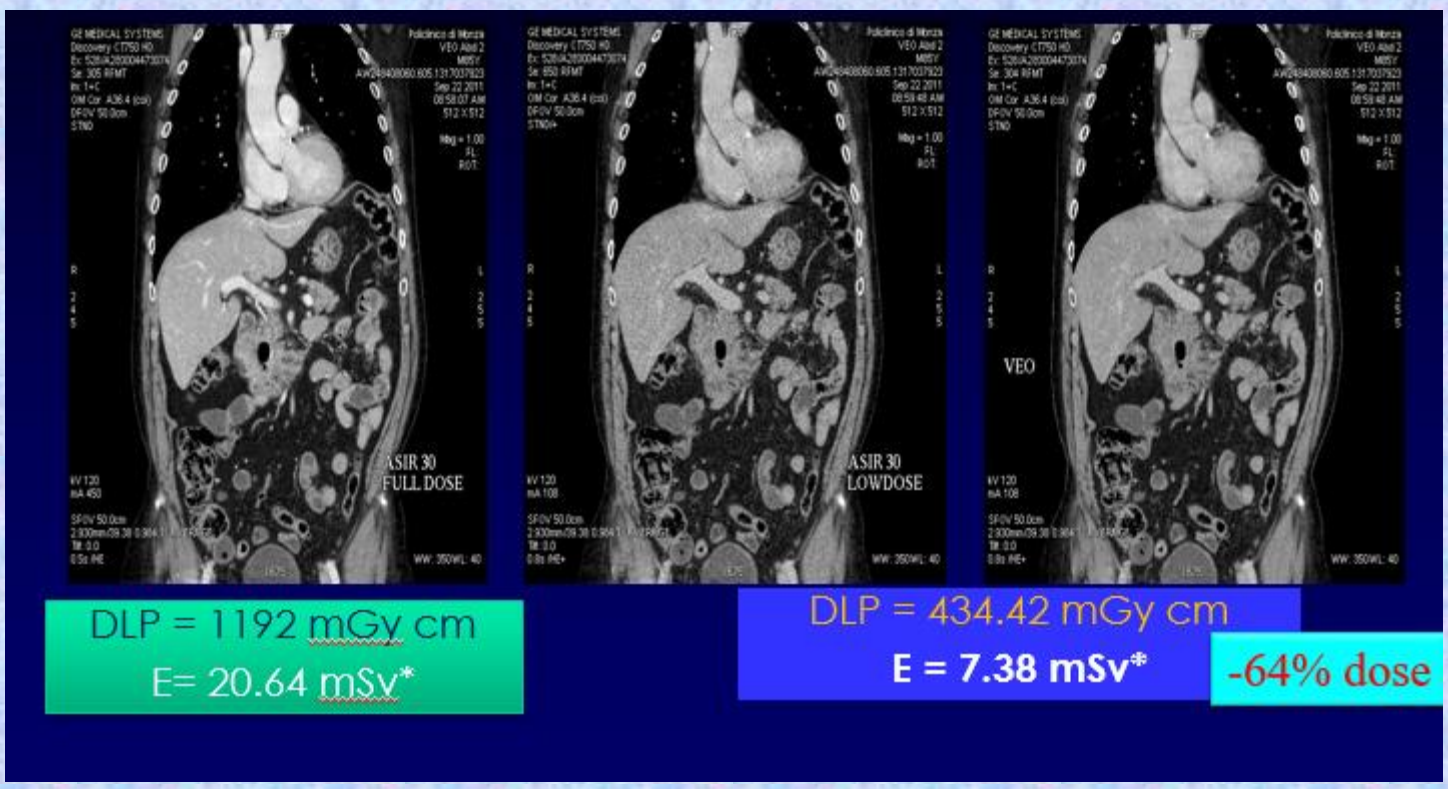


I dati relativi alle proiezioni calcolate vengono confrontati con i dati misurati in modo iterativo, fino ad ottenere una convergenza.

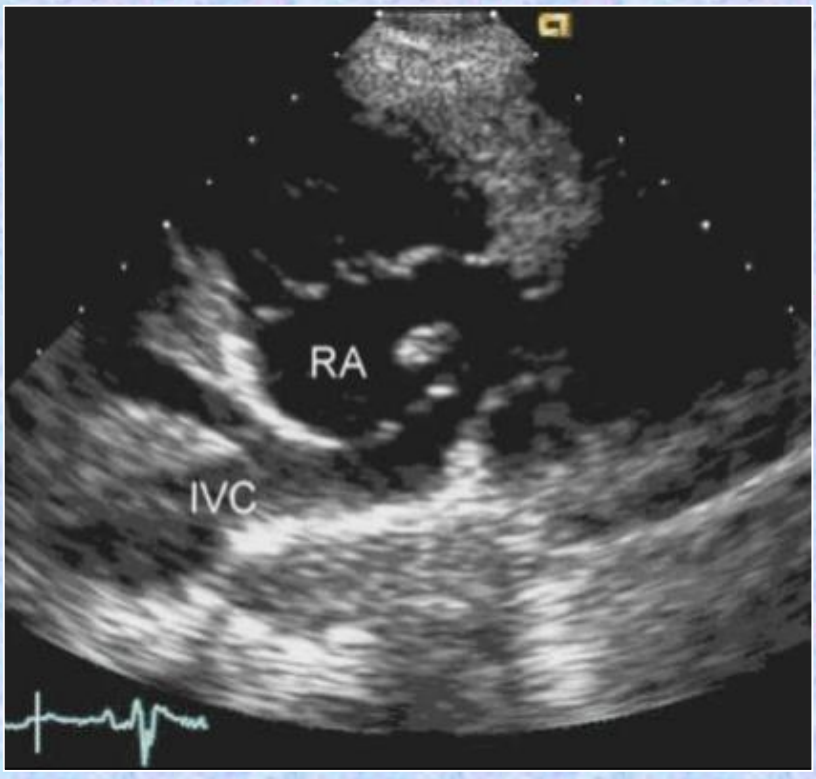
In TC l'uso di metodi di ricostruzione iterativi (IR) al posto della retroproiezione filtrata (FBP) consente, a parità di qualità dell'immagine, una cospicua riduzione della dose

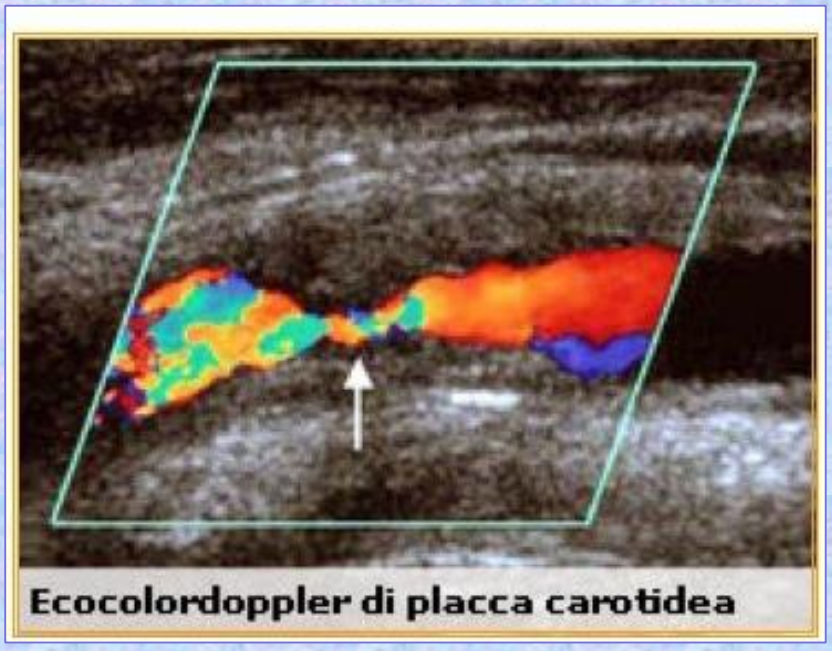
FBP: 120 kV – 450 mA

IR: 120 kV – 108 mA

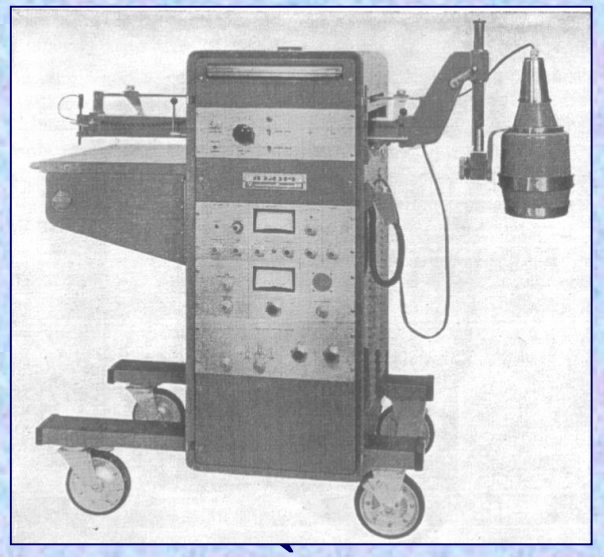


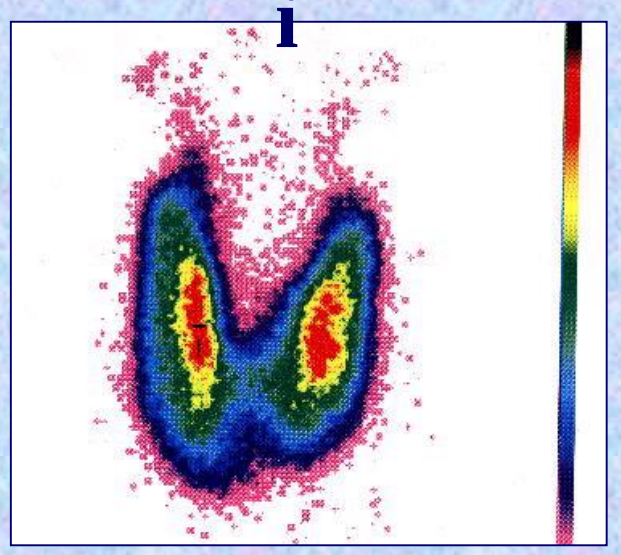
Le possibilità dell'ecografia




Ecocolordoppler di placca carotidea

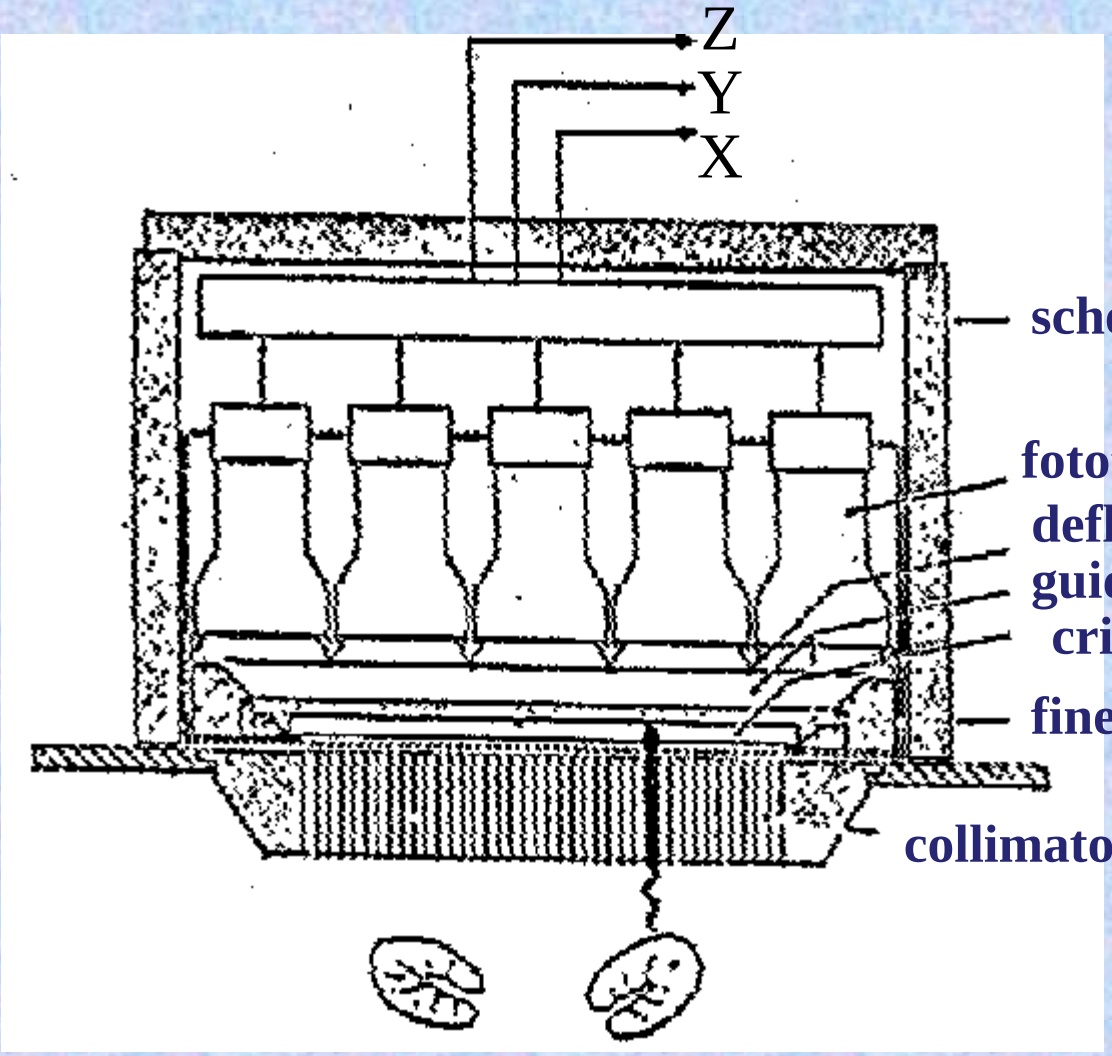
Seconda metà degli anni ’50:
inizia l’era della Medicina Nucleare





Scintigrafia tiroidea con I-131

Gamma camera di Anger



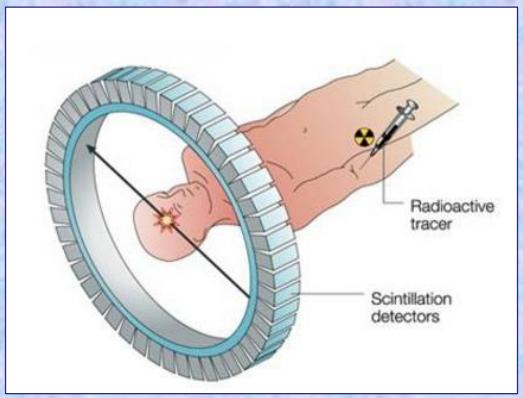
Gamma camera a doppia testa

^{99m}Tc

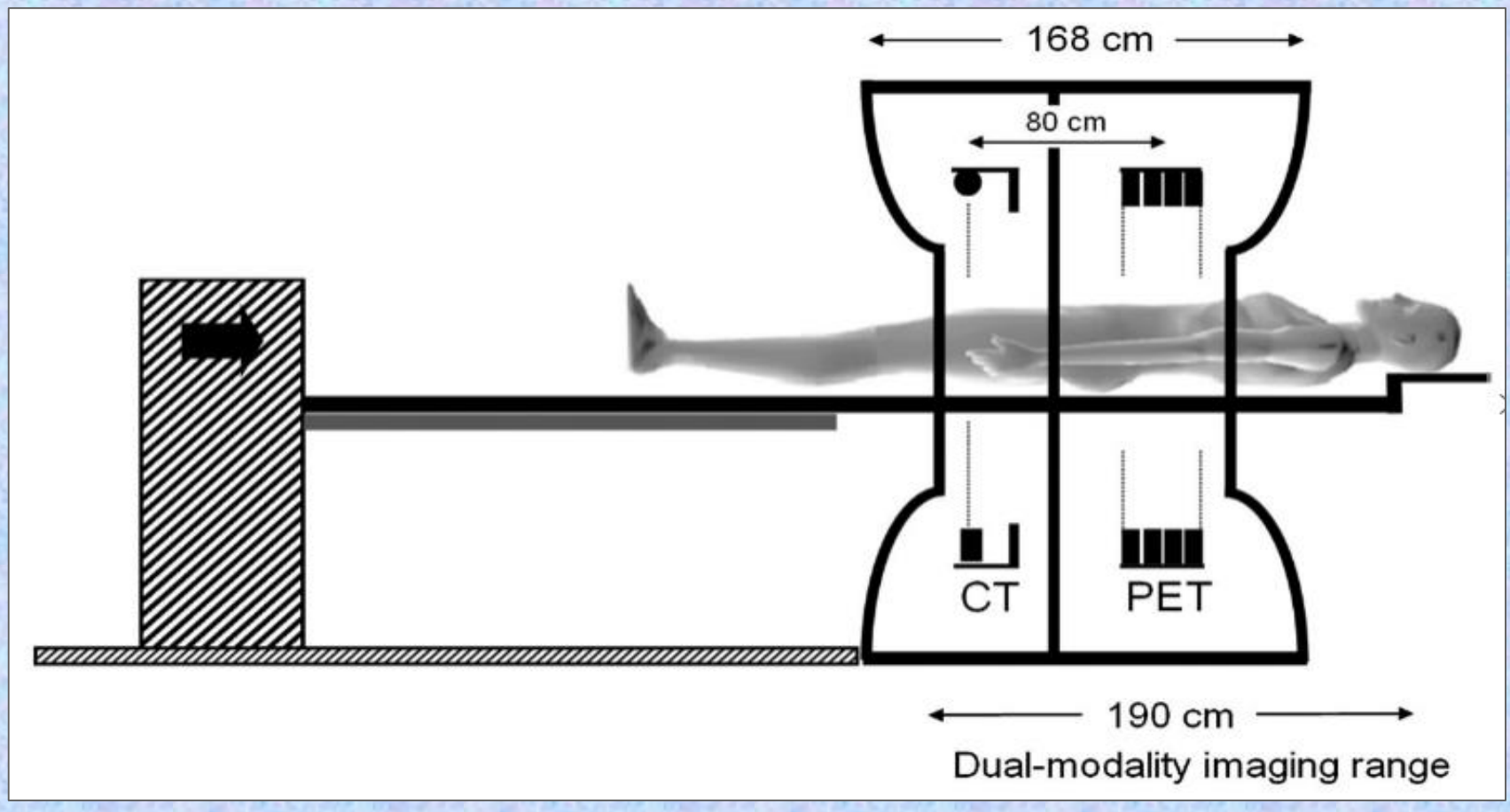
$$U\ (n,f) \rightarrow {}^{99}Mo\ (\beta^-,\ 67\ h) \rightarrow {}^{99m}Tc\ (\gamma\ 140\ keV,\ 6\ h)$$

$$^{98}Mo\ (n,\gamma)\ ^{99}Mo$$

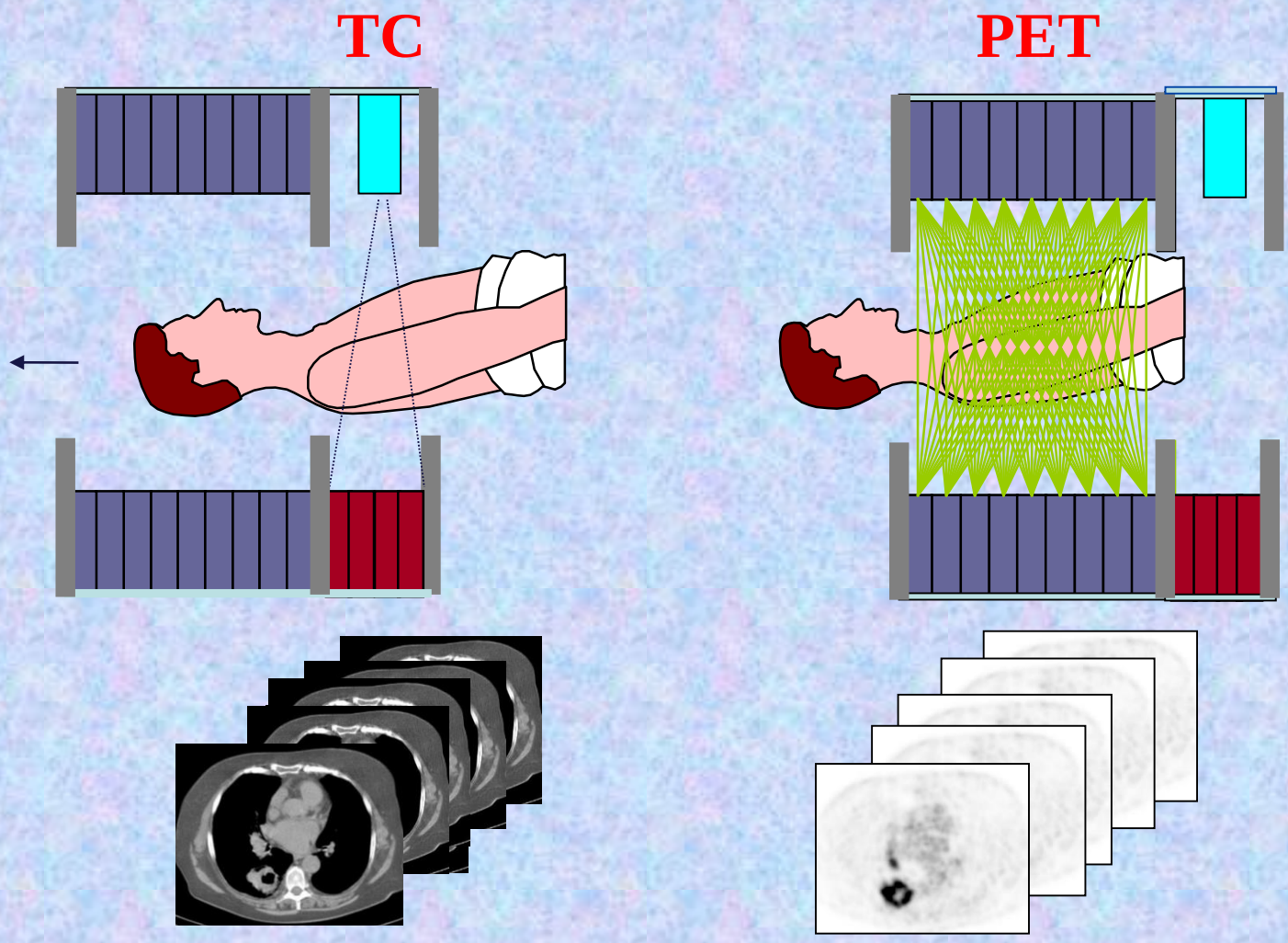
Radionuclidi β^+ emettitori per PET			
Radionuclide	Emivita (min)	Reaz. nucl.	Produzione
^{11}C	20,4	$^{10}B(d,n)^{11}C$	ciclotrone
^{13}N	10	$^{12}C(d,n)^{13}N$	“
^{15}O	2	$^{14}N(d,n)^{15}O$	“
^{18}F	110	$^{18}O(p,n)^{18}F$	“



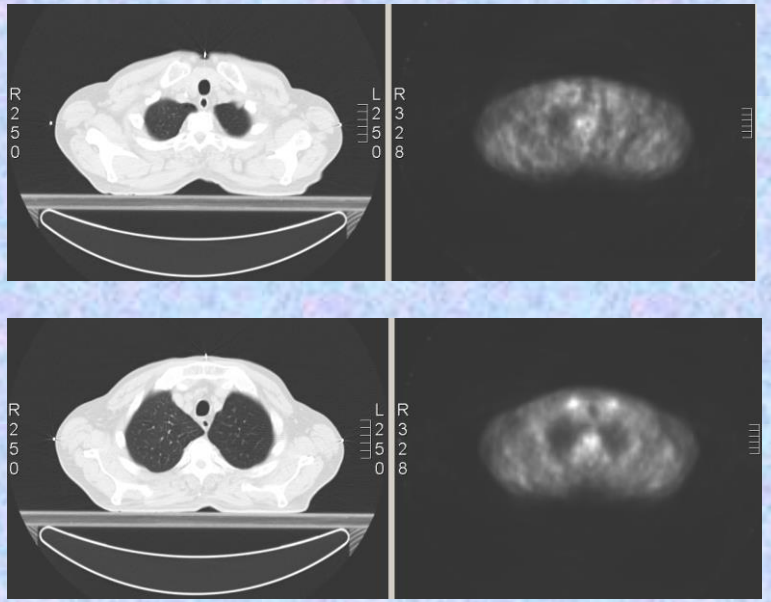
PET-TC: co-registrazione di immagini PET e TC

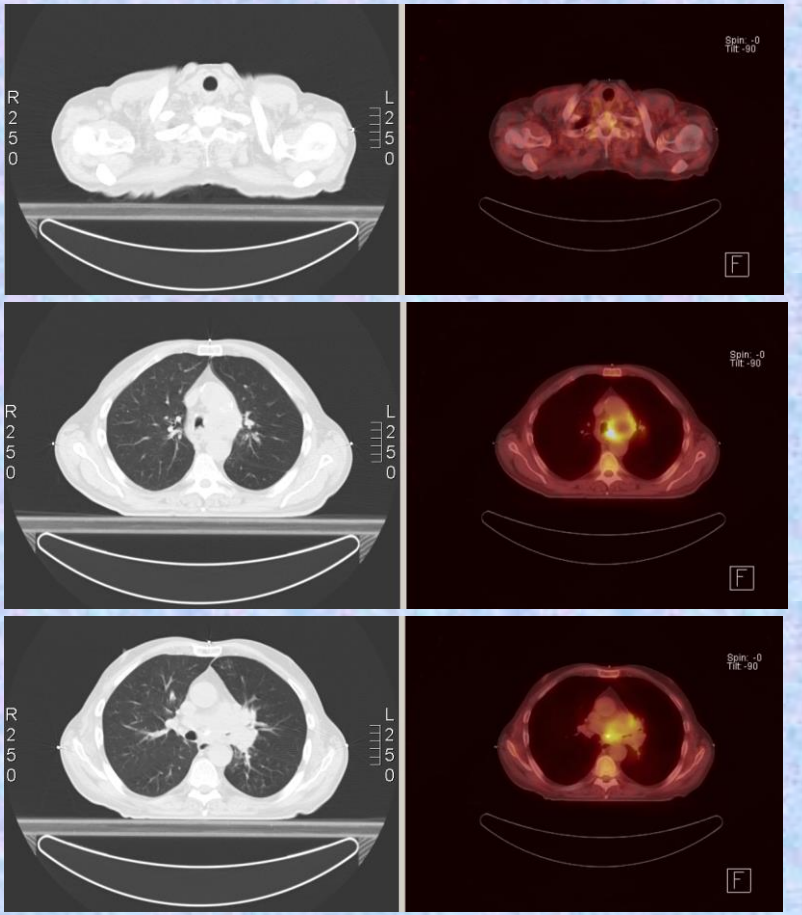


Il sistema integrato PET/TC



PET/TC
co-registrazione delle immagini





Caratteristiche dei cristalli a scintillazione

Cristallo	*Intensità relativa di emissione luminosa [%]*	*Lunghezza d'onda di picco della luce emessa [nm]*	*Costante di tempo di emissione della luce [ns]*	*Densità [g/cm3]*	*Numero atomico effettivo [Z]*	*Risoluzione energetica a 511 keV [%]*
NaI(Tl)	**100**	**410**	**230**	**3,7**	**50**	**8**
BGO	**15**	**480**	**300**	**7,1**	**73**	**12**
LSO	**75**	**420**	**40**	**7,4**	**65**	**10**
GSO	**20-40**	**410**	**60**	**6,7**	**58**	**9**
LYSO	**75**	**420**	**40**	**7,1**	**66**	**8**

La Fisica Medica e i “fisici medici” in Italia

I “fisici medici”:

- **vengono formati nelle Scuole di Specializzazione in Fisica Medica**
- **operano nelle “strutture complesse/semplici” di Fisica Medica**
- **afferiscono alla AIFM, fondata a Milano nel 1988**

- **I Soci AIFM nel 2015 erano 990, di cui 123 specializzandi**
- **Nell’intero Paese esistono, al presente, 151 “strutture complesse/semplici” di Fisica Medica che, nella maggior parte, si occupano anche di radioprotezione**
- **Compiti e responsabilità dei “fisici medici” sono disciplinati dal D.lgs. 187/2000: “*Attuazione della Direttiva 97/43 EURATOM in materia di protezione sanitaria delle persone contro i pericoli delle radiaziuoni ionizzanti connesse ad esposizioni mediche*”**

Formazione

Scuole di Fisica Sanitaria (anni ’60 – ’70)

- Corsi annuali di perfezionamento sull’impiego sanitario di radioisotopi e radiazioni ionizzanti dell’Università di Bologna
- Corso di Cultura in Fisica Sanitaria dell'Università di Pisa
- Scuola di Perfezionamento in Fisica Sanitaria e Ospedaliera dell'Università di Milano (1976-77)
- Scuola di Perfezionamento in Fisica (indirizzo Fisica Sanitaria) dell'Università di Roma

Formazione

Scuola di specializzazione in Fisica Sanitaria/Medica

- **D.P.R. 10 marzo 1982 n. 162**

Classe: Fisica Sanitaria – Tipologia: Fisica Medica
afferisce alla Facoltà di Medicina e Chirurgia con il concorso della Facoltà di Scienze MM. FF. NN. – durata quadriennale

- **Decreto ministeriale febbraio 2015 n. 68**

La durata della Scuola, come quella di tutte le altre Scuole di Specializzazione dell'area medica, viene ridotta di un anno.
30% lezioni «frontali»
70% lezioni a contenuto prevalentemente pratico, con tirocinio obbligatorio presso strutture sanitarie convenzionate

Università di Milano
Università di Torino
Università di Genova
Università di Padova
Università di Bologna
Università di Firenze
Università di Pisa
Università di Roma - La Sapienza
Università di Roma - Tor Vergata
Università di Roma - Cattolica
Università dell'Aquila
Università di Napoli
Università di Bari
Università di Messina
Università di Catania
Università di Palermo
Università di Cagliari

17 Scuole di Specializzazione in Fisica Medica

Nel corrente Anno Accademico 2015-2016 è stato attivato il primo anno di corso soltanto presso la Scuola di Milano. Per il nuovo A.A., secondo quanto comunicato dal Prof. Franco Fusi, Presidente del CONDIR, nulla osta a che tutte le Scuole emettano il Bando per l'ammissione alla Scuola, e attivino quindi il nuovo primo anno.

La situazione del fisico medico a partire dall'istituzione delle Scuole di Specializzazione

Situazione attuale

- formazione di base approfondita e conoscenza degli aspetti medici
- altamente specializzato
- deve saper gestire una tecnologia molto sofisticata
- Quasi 900 fisici medici distribuiti (in modo disuniforme!) su tutto il territorio nazionale
- Il possesso del Diploma di Specializzazione in Fisica Medica consente di evitare il «tirocinio» previsto per poter sostenere l'esame per l'iscrizione nell'elenco degli Esperti Qualificati

Prospettive future

- crescita probabilmente lenta del numero totale
- ricambio generazionale
- superspecializzazione ?

Direttiva EU 59/2013

Capo VIII – Esposizioni mediche – art. 58: procedure

Coinvolgimento del fisico medico

d) nelle pratiche medico-radiologiche sia opportunamente coinvolto uno specialista in fisica medica; il livello di intervento di tale specialista è proporzionale al rischio radiologico associato alla pratica In particolare:

i) nelle pratiche radioterapeutiche diverse dalle pratiche terapeutiche standardizzate di medicina nucleare deve essere strettamente coinvolto uno specialista in fisica medica;

ii) nelle pratiche terapeutiche standardizzate di medicina nucleare e nelle pratiche di radiodiagnostica e radiologia interventistica, comportanti alte dosi, come indicato all'articolo 61, paragrafo 1, lettera c), deve essere coinvolto uno specialista in fisica medica;

iii) per altre pratiche medico-radiologiche non contemplate alle lettere a) e b), deve essere coinvolto, ove opportuno, uno specialista in fisica medica per consultazioni e pareri sui problemi connessi con la radioprotezione relativa alle esposizioni mediche;

Articolo 61

Pratiche speciali

1. Gli Stati membri provvedono affinché siano usate attrezzature medico-radiologiche, tecniche pratiche e attrezzature ausiliarie adeguate per le esposizioni mediche:

a) di bambini;

b) nel quadro di programmi di screening sanitario;

c) comportanti alte dosi per il paziente, come può avvenire per la radiologia interventistica, la medicina nucleare, la tomografia computerizzata o la radioterapia.

È prestata particolare attenzione ai programmi di garanzia della qualità e alla valutazione della dose o alla verifica dell'attività somministrata per tali pratiche.

2. Gli Stati membri provvedono affinché i medici specialisti e i soggetti di cui all'articolo 57, paragrafo 2, che effettuano le esposizioni indicate al paragrafo 1 ricevano una formazione appropriata su queste pratiche medico-radiologiche secondo quanto dispone l'articolo 18.

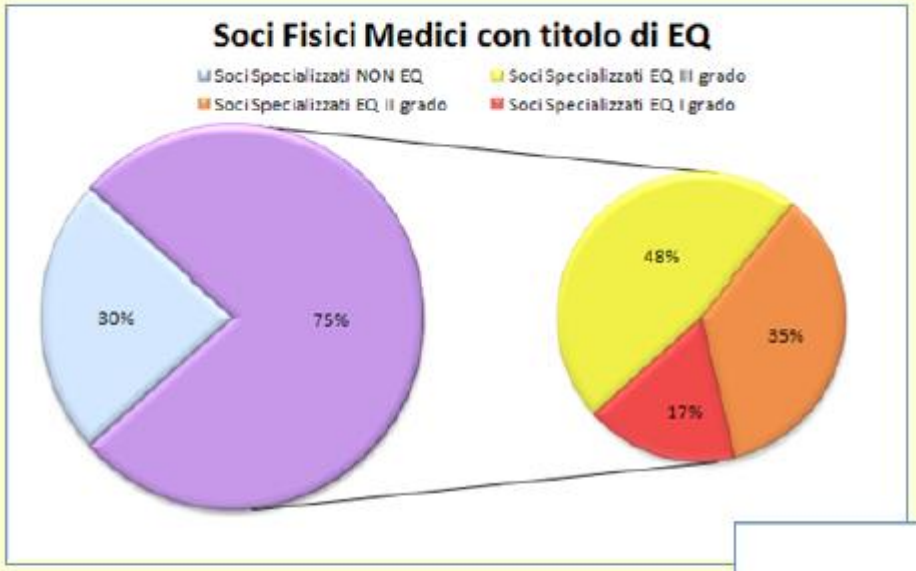
e) gli audit clinici siano effettuati secondo le procedure nazionali;

f) in caso di costante superamentodei livelli diagnostici di riferimento, si proceda ad adeguate verifiche locali e, senza indebito ritardo, a un appropriato intervento correttivo.

L. Begnozzi - La Fisica Sanitaria in Italia e la Direttiva 59/13 EURATOM - Udine 18 Dicembre 2015

Devo questa slide e le tre successive, tratte da una Relazione del Past-President dell'AIFM Dr.ssa Luisa Begnozzi, alla cortesia dell'attuale Presidente, dr. Michele Stasi

Soci con abilitazione di EQ



I numeri di AIFM

Distribuzione delle realtà di fisica medica sul territorio nazionale

- I soci 2015 attualmente sono 990 di cui 123 specializzandi
- Nel «*dove siamo*» sono censite attualmente 151 nuclei (strutture semplici o complesse o altro) e i fisici riportati sono 669

I numeri del Ministero della Salute

Ministero della Salute

Fabbisogno delle Professioni Sanitarie e Mediche a.a. 2015/2016

Incontro Ministero della Salute con le Federazioni e Associazioni

Roma, 31 marzo 2015

Ministero della Salute

Il fabbisogno regionale di specialisti "non medici"

Rilevazione del fabbisogno di specialisti di cui all'art. 8 della L. 401/2000 *

PROFESSIONE	FABBISOGNO REGIONALE 2014/2015	2014/2016	2014/2017
Veterinario	213	212	215
Odontoiatra	137	132	129
Farmacista	253	248	246
Biologo	278	278	277
Chimico	119	120	119
Fisico	89	89	88
Psicologo	265	265	264

* Il numero di laureati appartenenti alle categorie dei veterinari, odontoiatri, farmacisti, biologi, chimici, fisici, psicologi iscrivibili alle scuole di specializzazione post-laurea è determinato ogni tre anni secondo le medesime modalità previste per i medici dall'articolo 35 del decreto legislativo 17 agosto 1999, n. 368, ferma restando la rilevazione annuale delle risorse già previste, del fabbisogno anche ai fini della ripartizione annuale delle borse di studio nell'ambito

Piccoli numeri

ACCADEMIA DELLE SCIENZE
DI TORINO

Accademia delle Scienze di Torino: Veritas et Utilitas

La Fisica Medica: utilitas in veritate