



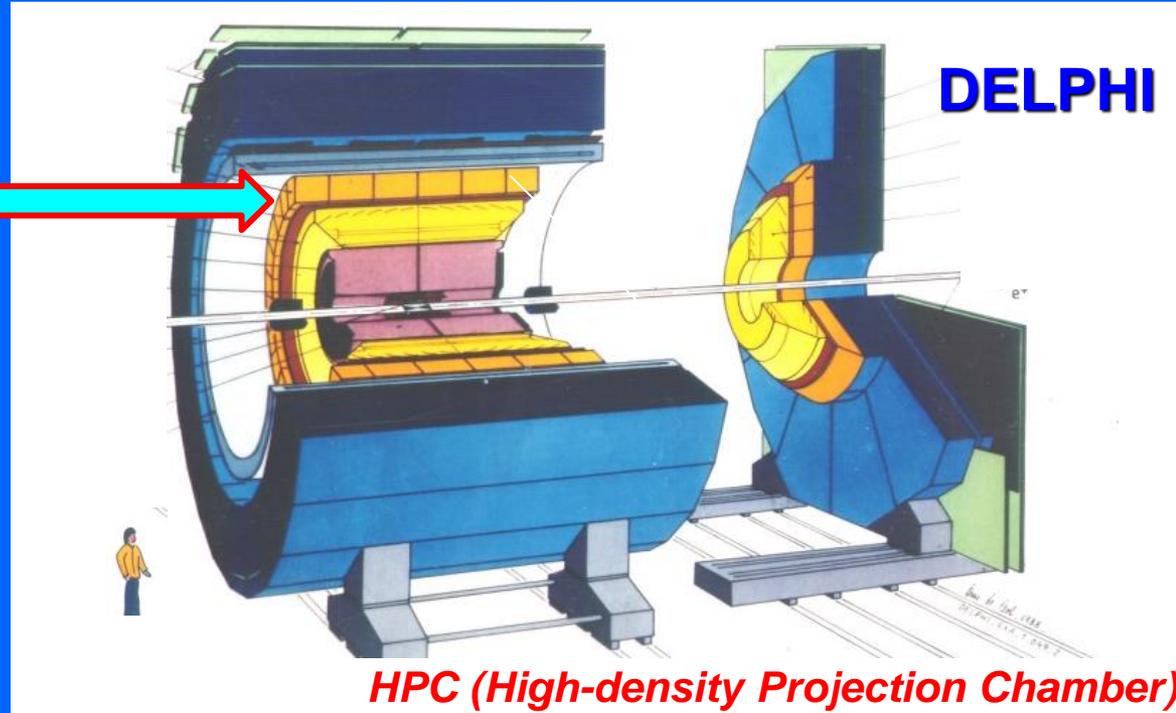
July 1996 - October 2003: from PIMMS to CNAO

Sandro Rossi

30th Anniversary of TERA Foundation
CERN, September 15th, 2022

CNAO
Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

*During my thesis in high-energy physics (1988-1989),
I met Ugo Amaldi as “spokesperson”
of DELPHI Collaboration*



Started as a fellow of TERA Foundation in September 1992

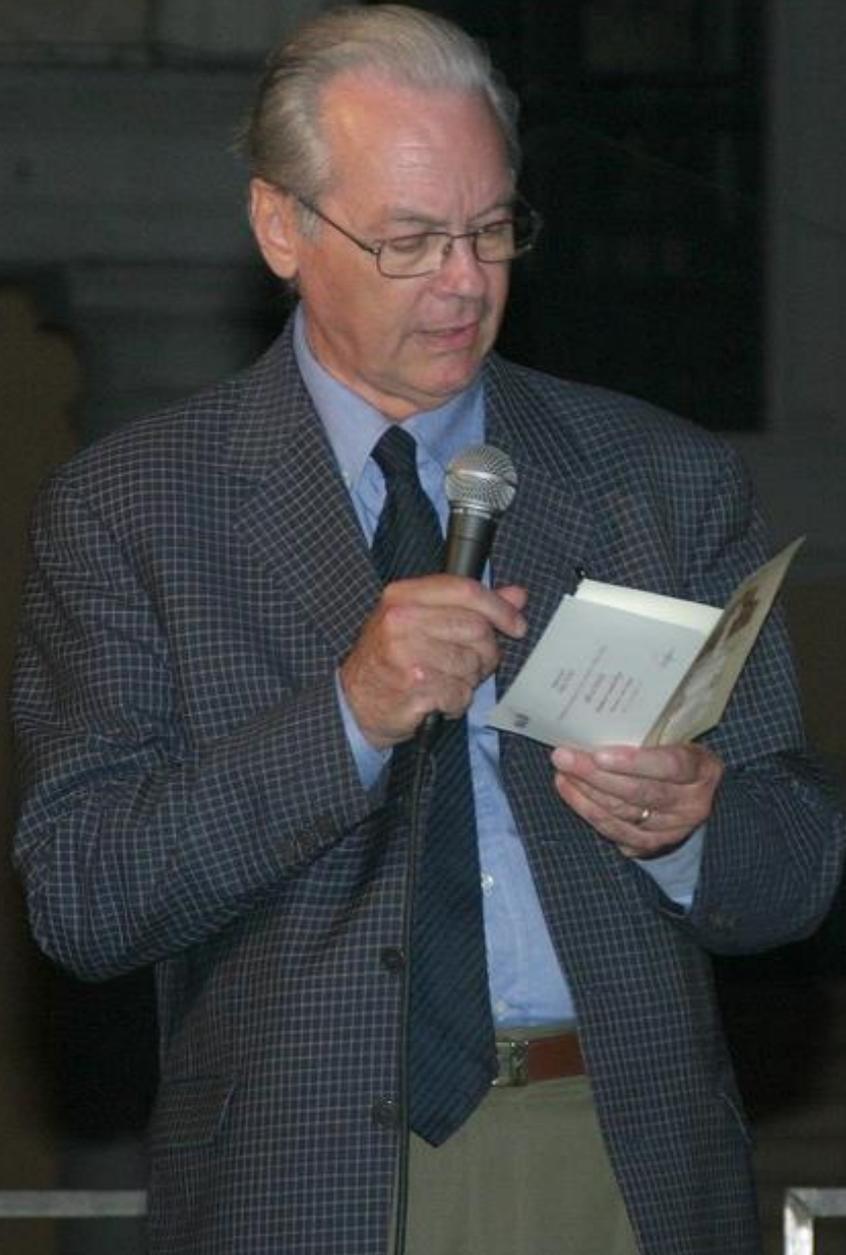
1992-1995 Amaldi's assistant at UniMi (Como seat) – Fisica Superiore + Medical Physics

Project leader of CNAO from July 1996 to October 2003

Board member of TERA from December 1997 to October 2003



Ugo Amaldi



Gaudenzio Vanolo

IL CENTRO NAZIONALE DI ADROTERAPIA ONCOLOGICA

A MIRASOLE

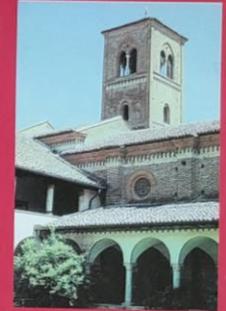
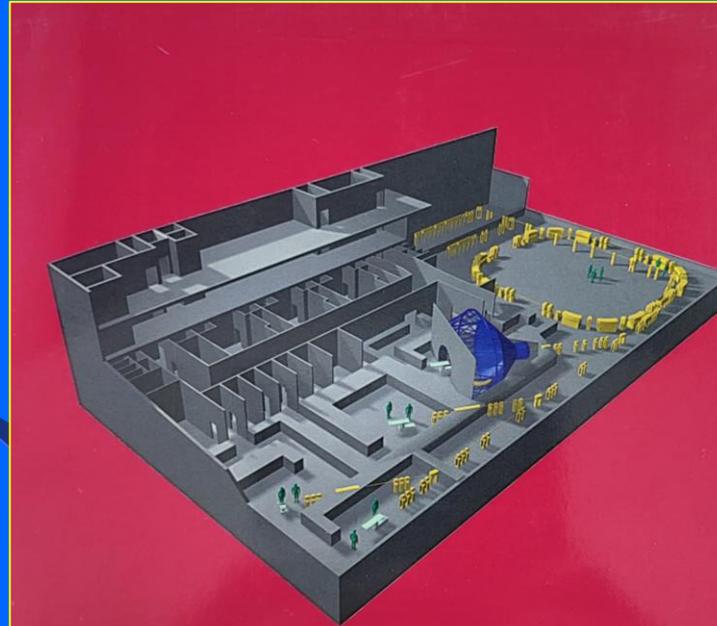
THE NATIONAL CENTRE FOR
ONCOLOGICAL HADRONTHERAPY AT MIRASOLE

FONDAZIONE TERA

A cura di Ugo Amaldi



CNAO: 1997 Project for Mirasole (Milan) *Red Book*



360 pages

Promoting Committee

- *Fondazione Salvatore Maugeri - IRCCS, Pavia,*
- *Fondazione TERA, Novara,*
- *Istituto Europeo di Oncologia - IRCCS, Milano,*
- *Istituto Nazionale per lo Studio e la Cura dei Tumori - IRCCS, Milano,*
- *Istituto Nazionale Neurologico C. Besta - IRCCS, Milano,*
- *Ospedale Maggiore - IRCCS, Milano,*
- *Policlinico San Matteo - IRCCS, Pavia,*
- *Politecnico di Milano,*
- *Università degli Studi di Milano,*
- *Università degli Studi di Pavia.*

Red Book

Index & authors

INDICE

RIASSUNTO OPERATIVO <i>Il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica</i> U. Amaldi e G. Tosi	Pag. 1
EXECUTIVE SUMMARY <i>The National Centre for Oncological Hadrontherapy</i> U. Amaldi and G. Tosi	Pag. 17
* * *	
Cap. 1 <i>Statuto della Fondazione TERA</i>	Pag. 31
Cap. 2 <i>Il Programma Adroterapia</i> U. Amaldi	Pag. 37
Cap. 3 <i>Indicazioni cliniche e tecnologie dell'adroterapia</i> U. Amaldi, J. Bernier, P. Boyle, G. Broggi, F. Corbella E. Emiliani, G. Gardani, P. Gerundini, C. Giorgi, M. Krengli, <u>R. Orecchia</u> , G. Robustelli della Cuna e G. Tosi	Pag. 49
Cap. 4 <i>Relazione del Gruppo di studio per l'adroterapia oncologica della Commissione Oncologica Nazionale</i> M. Benassi, G. Bernardo, G. Gardani, M. Grandolfo, A. Scanni, <u>U. Veronesi</u> (presidente) e V. Vitale	Pag. 75
Cap. 5 <i>Protocollo di intesa per la costituzione del Comitato Promotore del CNAO</i>	Pag. 81
Cap. 6 <i>Il sincrotrone del CNAO</i> L. Badano, M. Crescenti, F. Gramatica, P. Knaus, M. Pullia e <u>S. Rossi</u>	Pag. 87
Cap. 7 <i>Il bunker del CNAO</i> S. Agosteo, F. Gerardi, E. Pozzi e <u>P. Tabarelli de Fatis</u>	Pag. 121
Cap. 8 <i>Linee di trasporto del fascio e somministrazione della dose</i> S. Agosteo, <u>F. Gerardi</u> , F. Gramatica, R. Leone, M. Pullia e D. Scannicchio	Pag. 171
Cap. 9 <i>Dosimetria, piani di trattamento e posizionamento del paziente</i> <u>R. Cambria</u> e M. Russo	Pag. 215
Cap. 10 <i>Costo delle componenti di alta tecnologia</i> U. Amaldi, <u>R. Leone</u> e S. Rossi	Pag. 239
Cap. 11 <i>Il sito di Mirasole e gli edifici del CNAO</i> U. Amaldi, F. Chiappa, <u>E. Pozzi</u> e P. Tabarelli de Fatis	Pag. 255
Cap. 12 <i>Personale del CNAO, organizzazione e costi</i> <u>U. Amaldi</u> , R. Leone, R. Orecchia, S. Rossi e G. Tosi	Pag. 273
Bibliografia	Pag. 285

ATER: project in INFN

ATER-A: Acceleratori (Accelerators)

ATER – E: Elettronica (informatics and electronics)

ATER – I: Interdisciplinare (Interdisciplinary and radiobiology)

ATER – R: Rivelatori (Detectors and dosimetry)

Tabella 1 - Finanziamenti dell'INFN in R&S per l'adroterapia negli anni 1992-1998.

<i>Primo triennio</i>					
	1992	1993	1994	Totale	
Finanziamento globale [MLit]	160	235	275	670	
Sezioni INFN	2	5	5		
Esperimenti	1	2	2		
<i>Secondo triennio e anno di prolungamento</i>					
	1995	1996	1997	1998	Totale
Finanziamento globale [MLit]	827	792	579	489	2687
Sezioni INFN	11	11	11	11	
Esperimenti	8	14	13	14	
<i>Gran Totale [MLit]</i>				3357	

Responsabile: GIALANELLA

3.4 GLit = 1.7 MEuro

	1999	2000	2001
ATER A			
ATER.LINA	105	207	
ATER SOLA	39	55	
ATER TRIS	15	16	
ATER TESI	-	-	
ATER I			
ATER BIOR	100	111	
ATER FIBI	35	15	
ATER R			
ATER EMRI	48	30	
ATER MONDOT	18	11	
ATER PIXE	70	75	
ATER PROM	26	53	
ATER TLIP	14	26	

Finanziamenti ottenuti dall'INFN (in milioni di lire):

Sezione	Esperimento	1995	1996	1997	1998	TOTALE
	R - CAMIR	42	56	57	35	190
	I - MC	-	9	6	7	22
FERRARA		42	65	63	42	212
	A	45	-	-	-	45
	R - ALCAL	-	23	14	11	48
	I - MC	-	11	8	4	23
FIRENZE		45	34	22	15	116
	A	35	-	-	-	35
	E	31	13	30	17	91
	R - PAT	-	-	-	26	26
GENOVA		66	13	30	43	152
	A	254	194	59	54	561
	A - 2	50	-	-	-	50
	I - RADIOBIO	20	16	17	27	80
	I - MC	-	9	6	6	21
	I - BNCT	18	7	6	6	37
	R - CUBO	18	-	-	-	18
	R - FC200	-	19	7	6	32
	R - AMICO	2	4	6	5	17
	R - PAT	-	-	-	5	5
MILANO		362	249	101	109	821
	I - RADIOBIO	64	16	21	25	126
NAPOLI		64	16	21	25	126
	I - NICE	-	5	3	-	8
	R - AMICO	4	8	13	6	31
PADOVA		4	13	16	6	39
	R - PAT	7	-	-	5	12
PAVIA		7	0	0	5	12
	A	21	-	-	-	21
	E	14	6	2	4	26
	I - RADIOBIO	13	16	18	27	74
	R - ALA	-	46	27	15	88
	R - NMR	-	30	50	37	117
	R - CAL	-	106	58	27	191
ROMA-ISS		48	204	155	110	517
	I - BNCT	70	20	21	-	111
ROMA1		70	20	21	0	111
	E	2	2	1	2	7
	I - MC	-	-	4	4	8
	R CUBO	68	67	41	47	223
TORINO		70	69	46	53	238
	I - RADIOBIO	23	16	20	25	84
	I - NICE	-	12	12	-	24
	R - CAMIR	-	21	18	18	57
	R - AMICO	26	60	54	38	178
LNL		49	109	104	81	343
TOTALE		827	792	579	489	2687

Novara



Biccoca

CERN



TERA Headquarters
(+ CNR-Mi + Genova)

~ everywhere ...



IEO

Mirasole



Como

Optimization of the accelerator technology: PIMMS

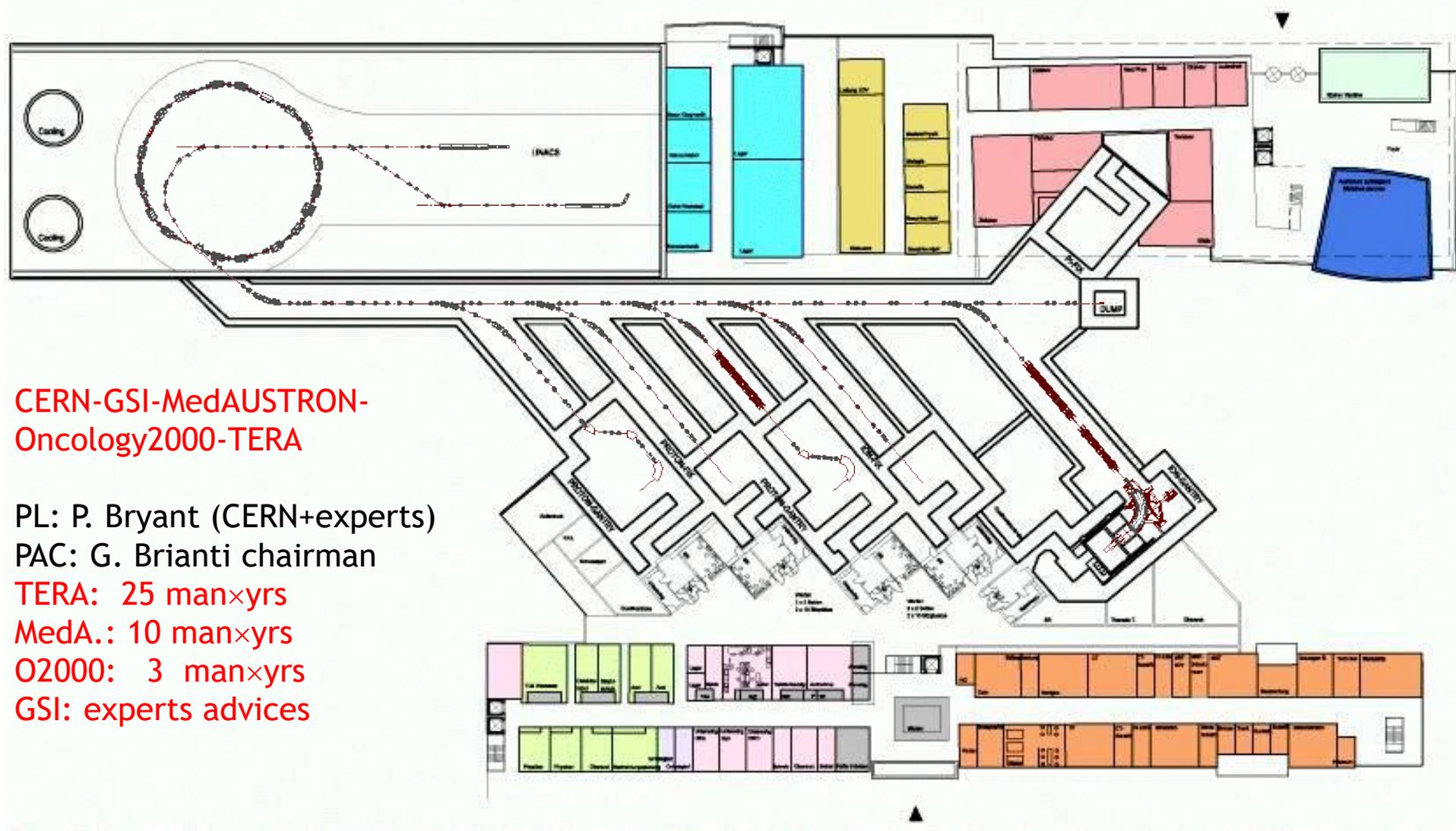
At the beginning of 1996, the CERN management agreed to launch a study of a synchrotron optimized for hadrontherapy under the acronym PIMMS (*Proton and Ion Medical Machine Study*).

PIMMS was a collaboration between CERN, GSI (Germany), Med-AUSTRON (Austria), Onkology 2000 (Czech Republic) and TERA (Italy). CERN contributed with the full-time leadership of Phil Bryant and the invaluable part-time assistance of many of its staff members, mainly drawn from the PS Division.

Giorgio Brianti was the Chairman of the Project Advisory Committee, including U. Amaldi, G. Bachy, J. Bosser, P. Bryant, P. Lefèvre, M. Regler, M. Silari, W. Scandale and other experts participating occasionally.

From 1996 to 1999 at CERN

PIMMS (Proton-Ions Medical Machine Study)



Objective: define the optimal hadrontherapy centre without constraints

Main characteristics of PIMMS

A short list of the special features of PIMMS includes:

- ✓ **two injector linear accelerators (linacs)**, one for protons (20 MeV) and the other for Carbon ions (7 MeV/u);
- ✓ two dispersion-free regions for injection and RF acceleration in **a lattice made of short and cheap bending magnets**;
- ✓ slow extraction based only on the excitation of a **“betatron core”** while all the currents in the other machine components are kept unchanged and the lattice satisfies the **“Hardt condition”**;
- ✓ an **‘empty’ bucket** that increases the velocity of the particles entering the extraction resonance, thus reducing the intensity fluctuations of the extracted beam;
- ✓ high-energy beam lines constituted by **independent optical modules with separate functions** (like dispersion matching and beam size selection) to allow simple operation;
- ✓ a mobile cabin gantry (named **Riesenrad gantry**) for Carbon ions;
- ✓ **“rotators”** to make the beam optics of each gantry completely independent of the gantry rotation angle.

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

CERN – PS DIVISION

CERN/PS 99-010 (DI)

**PROTON-ION MEDICAL MACHINE STUDY (PIMMS)
PART I**

Accelerator Complex Study Group*
supported by the Med-AUSTRON, Onkologie-2000 and the TERA Foundation
and hosted by CERN

Geneva, Switzerland
2 March 1999

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH

CERN – PS DIVISION

CERN-PS-2000-007 (DR)

**PROTON-ION MEDICAL MACHINE STUDY (PIMMS)
PART II**

Accelerator Complex Study Group
supported by the Med-AUSTRON, Onkologie-2000 and the TERA Foundation
and hosted by CERN

Geneva, Switzerland
27 July 2000

2001: 10th anniversary of TERA

I PROGRAMMI DI TERA



L. Ambrosin, P. Cardinali, A. Consonni, M. Giacomini
D. Porta, F. Trioschi, G. Vanolo, L. Zucca

SERVIZIO MEDICO – M. Krengli



R. Cirio, A. Scerbanenko, G. Vanolo, L. Zucca,

MOSTRA “ ATOMI PER LA SALUTE”



L. Ambrosin, S. Castegnaro, F. Gramatica

0,1-1 Mld

TERANET

ATLANTIDE - Portale in collaborazione con GANDALF

10-30 Mld

ACCELERATORI COMPATTI

LIBO - LInac BOoster

IDRA - Diagnostica con radioisotopi e Radioterapia con Adroni

~ 100 Mld

CENTRI DI ECCELLENZA

CNA - Centro Nazionale di Adroterapia
(e proposte per Lione e Stoccolma)

- **TESI** – Testata Superconduttrice per Ioni
- **CAP** - Computer Assisted Positioning:
- **SLIM** – rivelatore per fasci di adroni
- **TMI**: Treatment Modalities Intercomparison



25-26 May 2001 – 10 years of TERA in Orta San Giulio (Novara)

AMMINISTRAZIONE, SEGRETERIA E CONSIGLI

U. Amaldi, L. Ambrosin, E. Borgonovi, M. Capra, P. Cardinali, S. Castegnaro, R. Cirio, A. Consonni, M. Giacomini, F. Gramatica, A. Hegedus, M. Krengli, E. Rodini, M. Di Rosa, R. Orecchia, D. Porta, E. Ratcliff, S. Rossi, E. Santoro, A. Scerbanenko, G. Tosi, F. Trioschi, G. Vanolo, P. Viana e L. Zucca

Collaborazioni: Notaio Bellezza, Logos, Commercialista

ATLANTIDE

U. Borredon, M. Pozzato, E. Rodini, E. Santoro, S. Toncelli e G. Vanolo

Collaborazioni: GANDALF, Autodesk, Alcatel, Giacomini

IDRA

L. Ambrosin, F. Gerardi, M. Giacomini, M. Nodari, E. Santoro, S. Rossi e G. Vanolo

Collaborazioni: OM Novara, Studio Belgiojoso, BSB Logistica

LIBO

U. Amaldi, M. Mauri, R. Zennaro e M. Weiss

Collaborazioni: INFN – Mi&Na, CERN, IBA

CNA

U. Amaldi, L. Badano, E. Borgonovi, G. Brianti, M. Capra, L. Casalegno, R. Conturbia, M. Crescenti, M. Di Rosa, M. Donetti, S. Gallo, F. Gerardi, F. Gramatica, L. Mantovani, M. Nodari, R. Orecchia, M. Pezzetta, G. Primadei, M. Pullia, O. Rademakers, S. Rossi, S. Toncelli, G. Tosi, L. Ulrici e L. Zucca

Collaborazioni: CERN, INFN, LNF, PoliMi, UniBocconi, Unicredito, UniMi2, Ansaldo, OCEM, Karolinska

CAP: L. Mantovani; collaborazione con PoliMi e IEO

CUBO&PIXEL: M. Donetti; collaborazione con INFN-To, IBA

SLIM: L. Badano e M. Pezzetta; collaborazione con CERN, UniCo

TESI: F. Gerardi, C. Priano, M. Pullia, S. Rossi e S. Squarcia; collaborazione con Ansaldo SC, INFN-Ge e UniGe

TMI: A. Bolsi, M. Dominietto, L. Mantovani, R. Orecchia e G. Tosi; collaborazione con IOSI, IEO, OM-No, PSI e GSI

Totale Personale “TERA”: 50 (24 a tempo pieno)
 (“TERA” = rapporto in qualche modo formale con TERA)

Enti coinvolti: 31

Fellows and employees of TERA (1992-2002)

More than 100 persons covering all expertises!

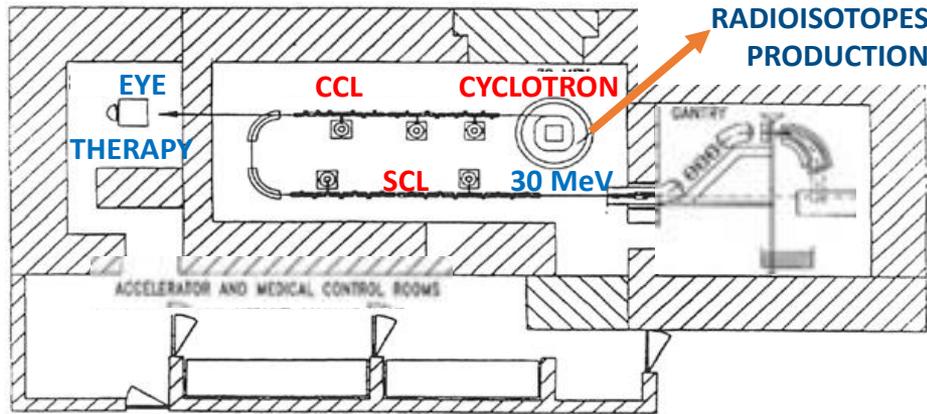
1	ABRUZZESE NICOLA
2	AL MAMUN IMTIAZUL HAQUE
3	ANKENBRANDT C.
4	ARDUINI GIANLUIGI
5	BACIGALUPO ALMALINA
6	BADANO LAURA
7	BARTOLINI RICCARDO
8	BERRA PAOLO
9	BOLSHAKOV A.E.
10	BOLSI ALESSANDRA
11	BORREDON UMBERTO
12	BORRI GIORGIO
13	BOURHALEB FAIZA
14	BRUSASCO CATERINA
15	BUDICIN DANIELA
16	CAMBRIA RAFFAELLA
17	CANZI CRISTINA
18	CAPRA MADDALENA
19	CASALEGNO LUIGI
20	CHIESA CARLO
21	CONTURBIA RICCARDO
22	CRANDALL KEN
23	CRESCENTI MASSIMO
24	DI ROSA MARIA
25	DOMINIETTO
26	DONETTI MARCO
27	ERMOLLI ILARIA
28	FERLITO ANDREA
29	FERRANDO ORNELLA
30	FERRARIS MAURIZIO

31	FRIXIONE PAOLO
32	FURETTA CLAUDIO
33	GALLO STEFANO
34	GAVIN LEA
35	GERARDI FRANCO
36	GOTTA ROMINA
37	GRAMATICA FURIO
38	GRECO PAOLO
39	HEGEDUS AGNES
40	ISOARDI PAOLA
41	KNAUSS PATRICK
42	KRENGLI MARCO
43	LAZZARI ROBERTA
44	LEFEVRE PIERRE
45	LEONE ROBERTO
46	LURASCHI FELICITA
47	MAGARAGGIA LAURA
48	MANTI LORENZO
49	MANTOVANI LAURA
50	MARTIN RON
51	MARTINA LUCIANO
52	MARZOLLI LUCA
53	MAURI MARCO
54	MERIGO ANNARITA
55	MUTTI VIVIANA
56	NODARI MIRCO
57	NONIS MAURO
58	OSELLO RAFFAELLA
59	PASQUINI
60	PASTORE FABRIZIO

61	PERNIGOTTI ELENA
62	PETRUCCI GUIDO
63	PEZZETTA MARCO
64	PIERANTONI GIOVANNI
65	POZZATO MARCELLO
66	POZZI ELENA
67	PRESILLA STEFANO
68	PRIANO CRISTIANA
69	PRIMADEI GIACOMO
70	PRINCIPE ROSARIO
71	PULLIA MARCO
72	RADEMAKERS ORNELLA
73	RAMON GONZALES AURORA
74	RATCLIFF ERIC
75	RAVASIO MANUEL
76	RIBONI DAVIDE
77	RISSO PIETRO
78	RODINI EMANUELA
79	ROLANDO VALTER
80	ROMERIO LORENZO
81	ROSSI SANDRO
82	RUSSO MARIA TERESA
83	SACCO ENZO
84	SANGALETTI LUIGI
85	SANTONI RICCARDO
86	SANTORO ELENA
87	SILARI MARCO
88	SORBI MASSIMO
89	SUSINI ALFREDO
90	TABARELLI PAOLA
91	TONCELLI SANDRO
92	TRIOSCHI FEDERICA
93	ULRICI LUISA
94	VANOLO GAUDENZIO
95	VECCHI LODOVICA
96	VIANA PAOLO
97	WEISS MARIO
98	ZANDERIGHI BARBARA
99	ZANOLLI ELENA
100	ZENNARO RICCARDO
101	ZUCCA MARMO LUCIANO
102	ZURLO ALFREDO

Second TERA project: 3 GHz linacs for proton therapy

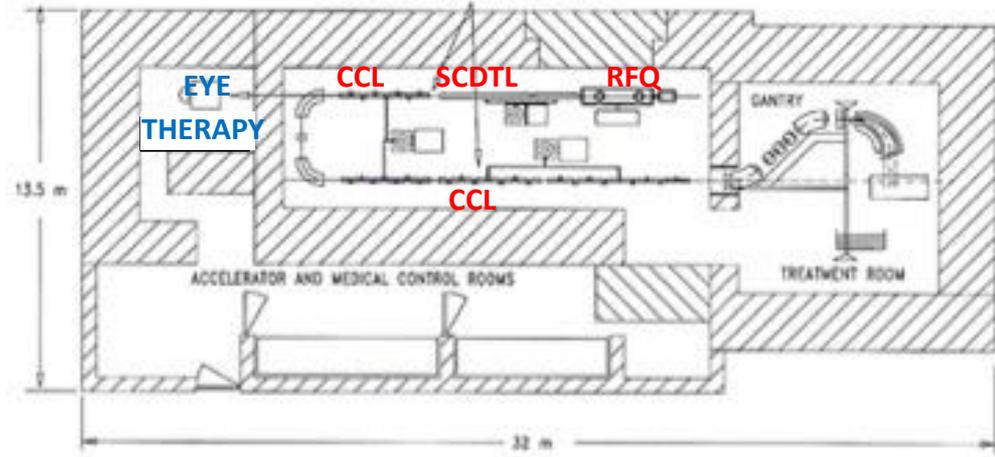
Two proposals based on frequency used only for electron linacs



U. Amaldi: 1993
 novel **cyc-linac** solution

30 MeV cyclotron injecting in a Cell Coupled Linac

200 MeV LINEAR ACCELERATOR



L. Picardi: 1993
 all-linac solution

RFQ injecting in a novel
Side Coupled Drift Tube Linac +
 a **Cell Coupled Linac**

THE RITA NETWORK AND THE DESIGN OF COMPACT PROTON ACCELERATORS

LA RETE ITALIANA TRATTAMENTI ADROTERAPICI E IL PROGETTO DI ACCELERATORI COMPATTI DI PROTONI

THE TERA COLLABORATION

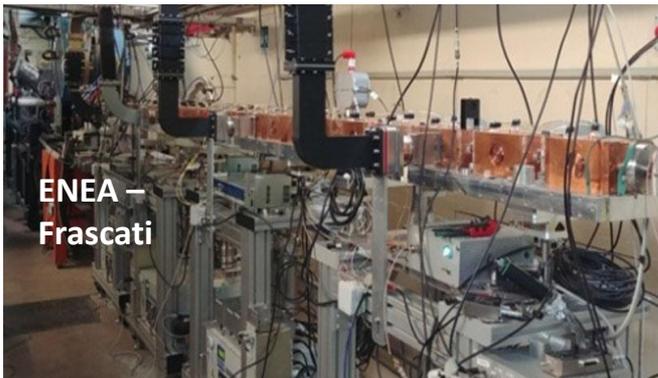
U. AMALDI, M. GRANDOLFO and L. PICARDI editors



500 pages !

PROGRAMMA ADROTERAPIA

INFN - ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
 AIFB - ASSOCIAZIONE ITALIANA DI FISICA BIOMEDICA
 AIFS - ASSOCIAZIONE ITALIANA FISICA SANITARIA
 AIRB - ASSOCIAZIONE ITALIANA DI RADIOBIOLOGIA
 AIRO - ASSOCIAZIONE ITALIANA DI RADIOTERAPIA ONCOLOGICA
 CERN - EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS
 ENEA - ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE
 ISS - ISTITUTO SUPERIORE DI SANITA'
 SIRR - SOCIETA ITALIANA PER LE RICERCHE SULLE RADIAZIONI
 TERA - FONDAZIONE PER ADROTERAPIA ONCOLOGICA



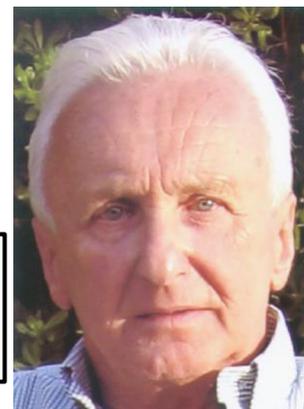
ENEA – Frascati

Two projects from the Green Book - 1995

CHAPTER 9

HIGH FREQUENCY PROTON LINAC

G. Benincasa¹, P. Bourquin¹, A. Lombardi², M. Nonis¹, G. Orlandi³, G. Parisi¹, L. Picard³, A. Pisent², C. Ronsivalle³, A. Susini⁴, B. Szeless¹, M. Vretenar¹, A. Vignati³, and M. Weiss⁴



LIBO

LIBO – a linac-booster for protontherapy: construction and tests of a prototype

TERA – CERN
INFN Milan- Naples

U. Amaldi^{a,*1}, P. Berra^a, K. Crandall^a, D. Toet^a, **M. Weiss¹**, R. Zennaro^a, E. Rosso^b, B. Szeless^b, M. Vretenar^b, C. Cicardi^{c,d}, C. De Martinis^{c,d}, D. Giove^{c,d}, D. Davino^{e,f}, M.R. Masullo^{e,f}, V. Vaccaro^{e,f}

ELSEVIER Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 521 (2004) 512–529

2004

IMPLART

Beam commissioning of the **35 MeV section** in an intensity modulated proton linear accelerator for proton therapy

L. Picardi¹, A. Ampollini¹, G. Bazzano^{b,1}, E. Cisbani^{b,2}, F. Ghio², R. M. Montecali^{b,1}, P. Nenzi^{b,1}, M. Piccinini¹, C. Ronsivalle^{b,1,*}, F. Santavenere², V. Surrenti¹, E. Trinca¹, M. Vadrucchi^{b,1} and E. Wembe Tafo³

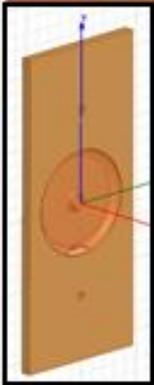
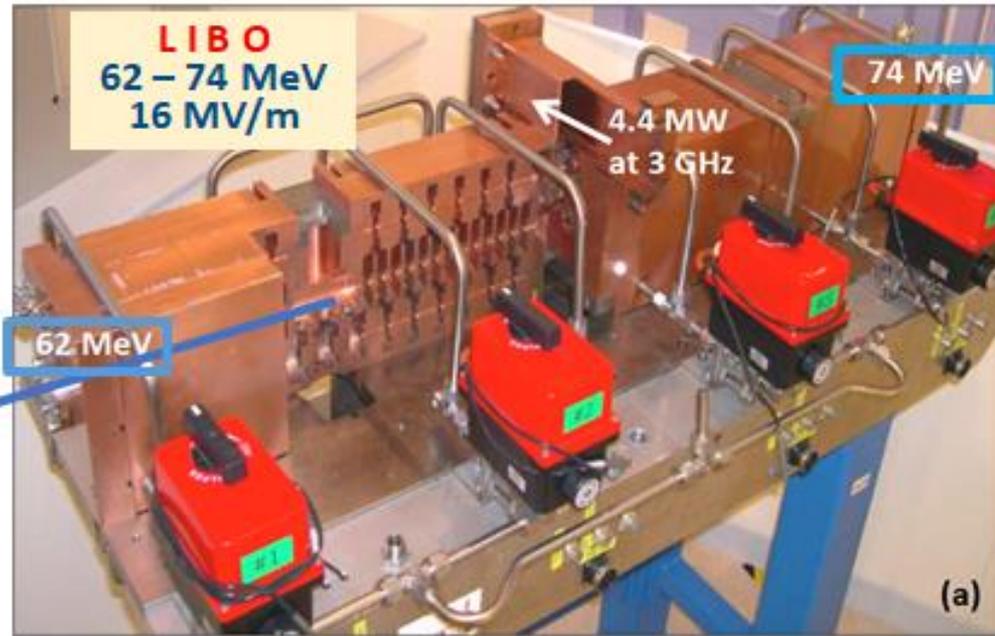
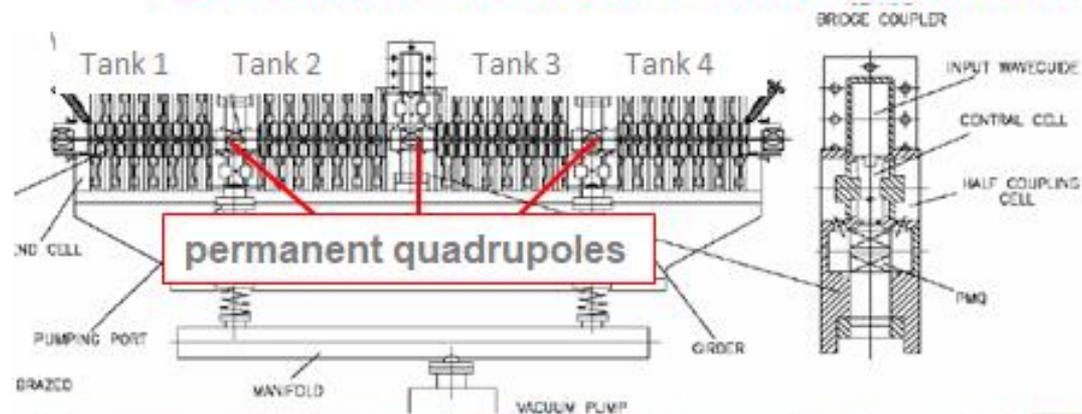
ENEA
Frascati

PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 23, 020102 (2020)

2020

Prototype built and beam tested by TERA – CERN – INFN Milan and Naples

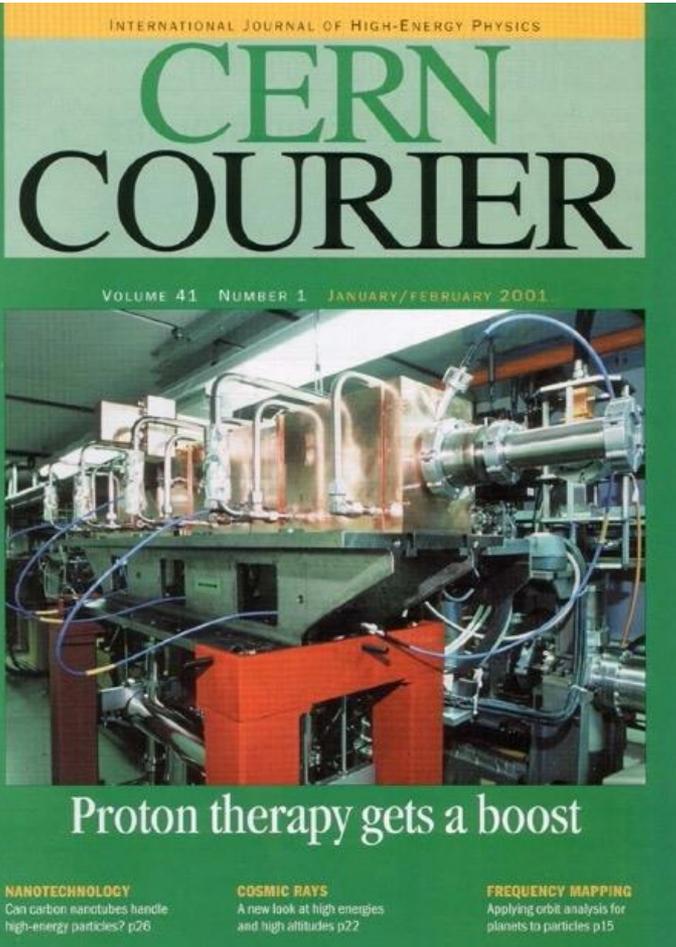
3 GHz proton standing wave Cell Coupled Linac



Proton beam from Catania SC cyclotron

First proton linear accelerator at 3 GHz, the frequency of electron linacs

LIBO is in Microcosm at CERN



LIBO power test at CERN: from 16 MV/m to 27 MV/m

CNAO = National Centre for Oncological Hadrontherapy

Not-for-profit private Foundation

**Created by the Italian Ministry of Health in 2001
following a request of TERA Foundation**

with the purpose to build and run a hadrontherapy Centre



July 2002 - October 2003:

Final design and 23 persons from TERA to CNAO

(11 still in the Project 20 years after ...)

N.	COGNOME	NOME	Tipo contratto
1	Rossi	Sandro	Indeterminato
2	Pullia	Marco	indeterminato
3	Gerardi	Franco	Indeterminato
4	Caldara	Michele	Indeterminato
5	De Cesaris	Ivan	Indeterminato
6	Donetti	Marco	Indeterminato
7	Greco	Paolo	Indeterminato
8	Lanzavecchia	Lorenzo	Indeterminato
9	Mutti	Viviana	Indeterminato
10	Nodari	Mirco	Indeterminato
11	Parravicini	Anna	Indeterminato
12	Pezzetta	Marco	Indeterminato
13	Franchellucci	Andrea	Progetto a tempo pieno
14	La Bella	Stefano	Progetto a tempo pieno
15	Priano	Cristiana	Progetto a tempo pieno
16	Tiberti	Matteo	Progetto a tempo pieno
17	Bosser	Jacques	Progetto a tempo parziale
18	Chimenti	Virgilio	Progetto a tempo parziale
19	Gallo	Stefano	Progetto a tempo parziale
20	Primadei	Giacomo	Progetto a tempo parziale
21	Brianti	Giorgio	Consulente
22	Casalegno	Luigi	Consulente
23	Toncelli	Sandro	Consulente

+ Documents, designs
and drawings for about
2000 (!) pages



Franco Gerardi

CNAO Personnel in 2022

Total number: **138**

Women: **73**

Mean age: 40

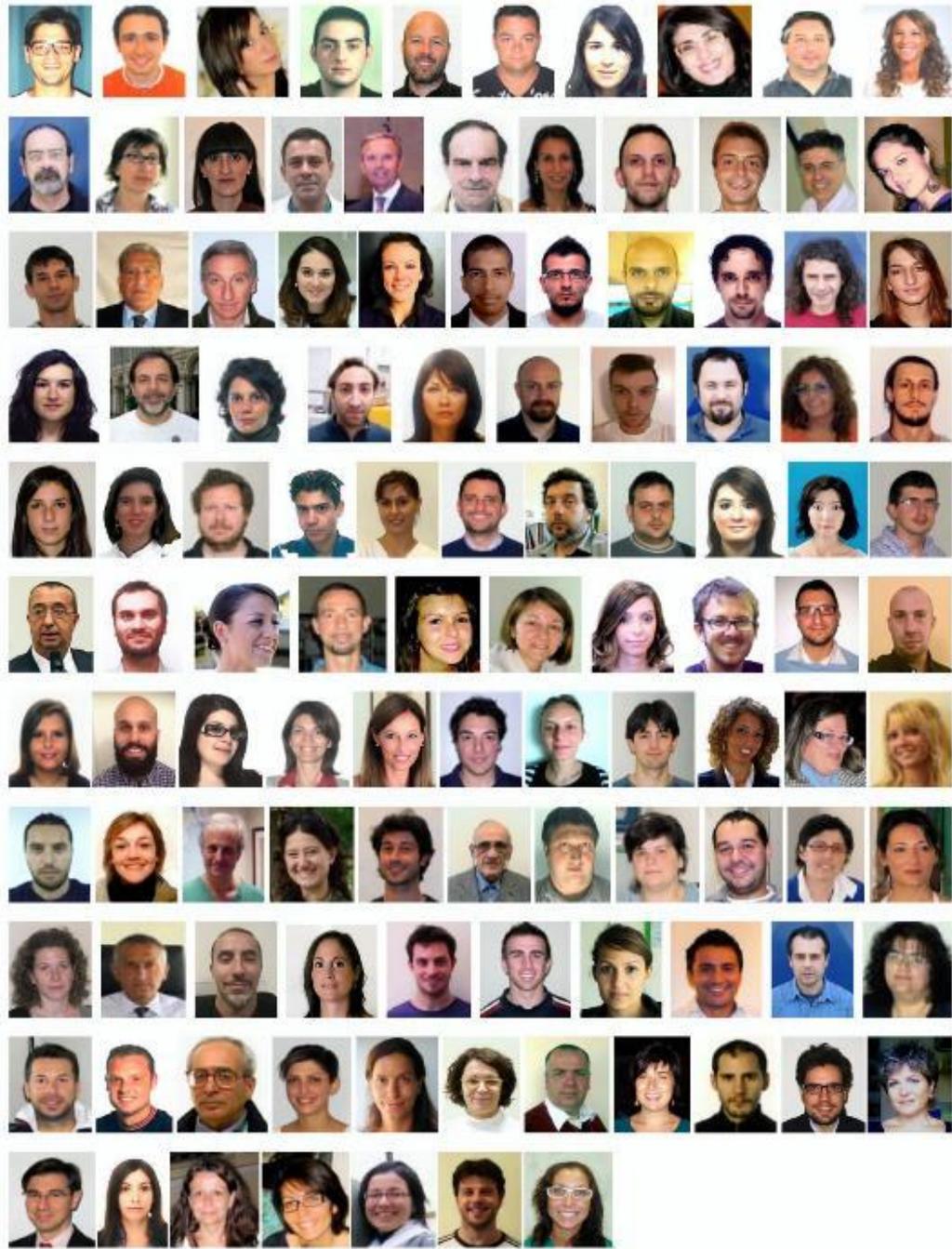
Men: **65**

Mean age: 40

Graduates: **79% (39% PhD)**

Positions: **20**

Disciplines: **12**



Collaboration agreements: fundamental contracts for construction and presently for technology R&D

NATIONAL

TERA Foundation: final design and high tech specifications

INFN: technical issues (15 systems), radiobiology, research, formation

University of Milan: medical coordination and formation

University of Pavia: technical issues, radiobiology, formation

Polytechnic of Milan: patient positioning, radioprotection, authorisations

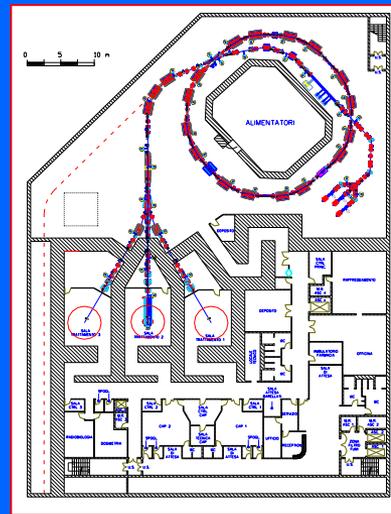
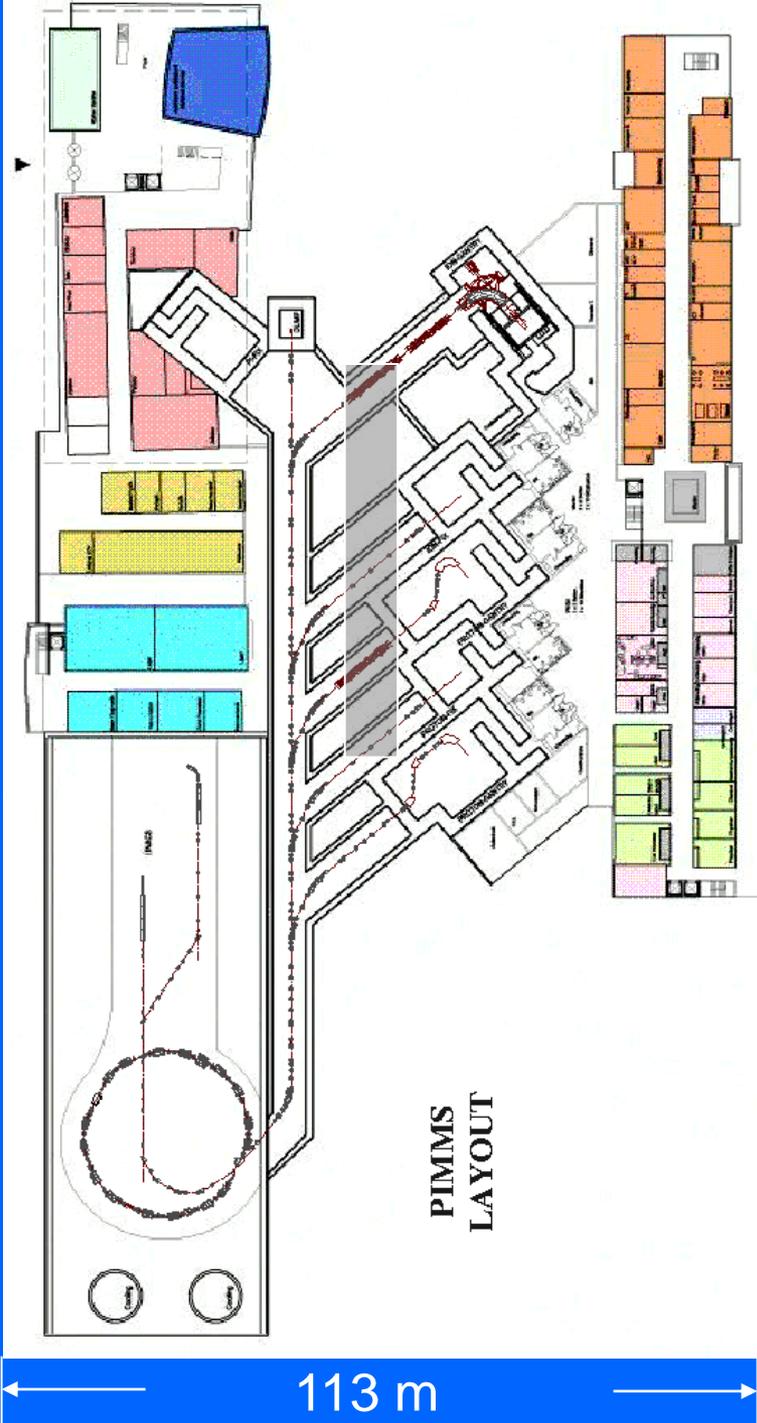
INTERNATIONAL

CERN (Geneva): technical tasks, PIMMS

GSI (Darmstadt): linac and special components

LPSC (Grenoble): technical tasks

NIRS (Chiba): medical activities, radiobiology, formation



205 m

57 m

77 m

PIMMS vs CNAO

(to scale)

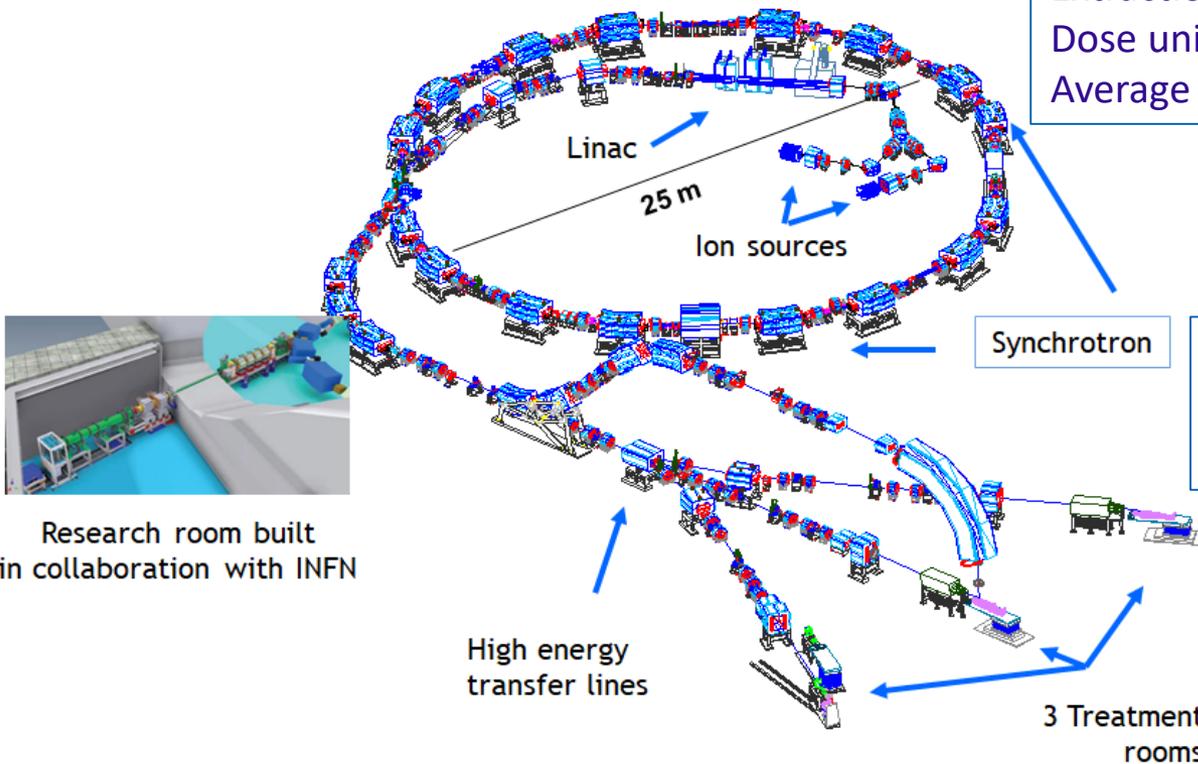


The final CNAO system

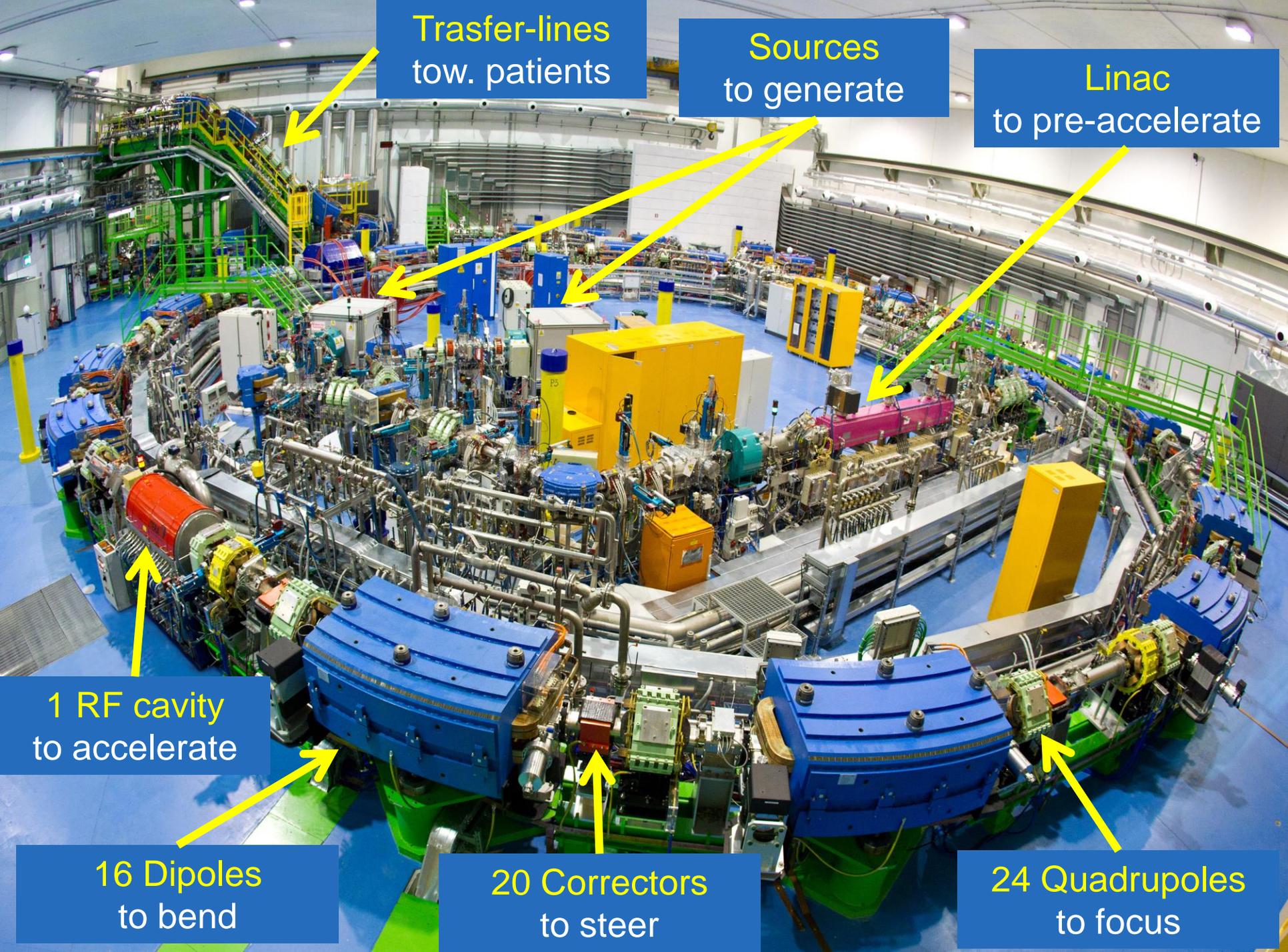
Intellectual property shared by CNAO-INFN-CERN

Accelerated ion	p, C
Energy range (MeV/u)	60-225 (p) (30-320mm) 120-400 (C) (30-270mm)

Extraction	Slow	
Dose uniformity		$\pm 2.5\%$
Average dose rate		2 Gy/min/liter



Field size (mm × mm)	200 × 200
Beam size (FWHM) (mm)	4-10
Beam position precision (mm)	0.1



Trasfer-lines
tow. patients

Sources
to generate

Linac
to pre-accelerate

1 RF cavity
to accelerate

16 Dipoles
to bend

20 Correctors
to steer

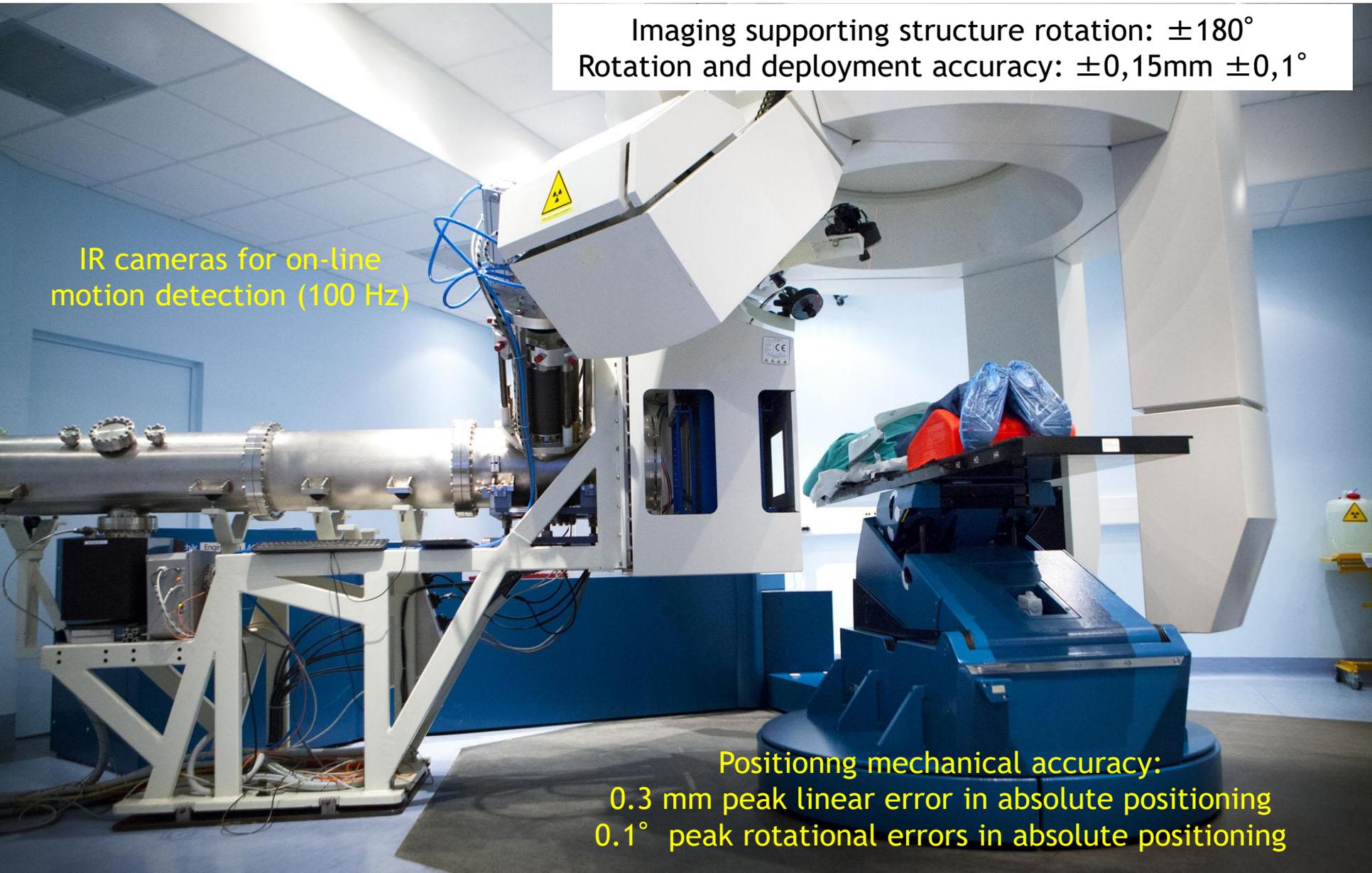
24 Quadrupoles
to focus

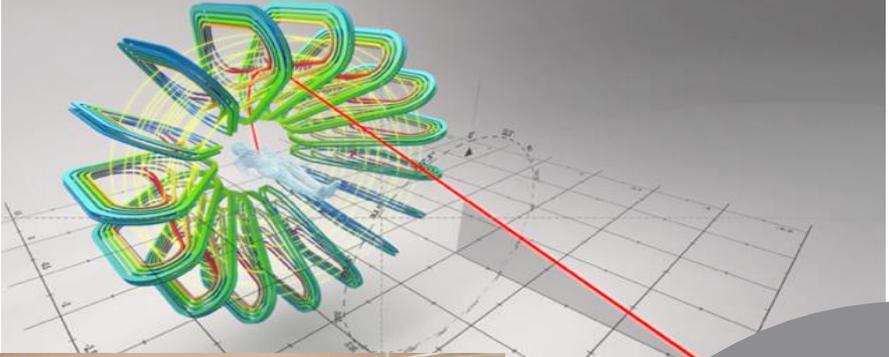
The treatment room

Imaging supporting structure rotation: $\pm 180^\circ$
Rotation and deployment accuracy: $\pm 0,15\text{mm}$ $\pm 0,1^\circ$

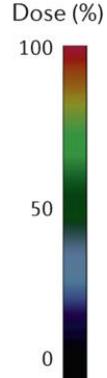
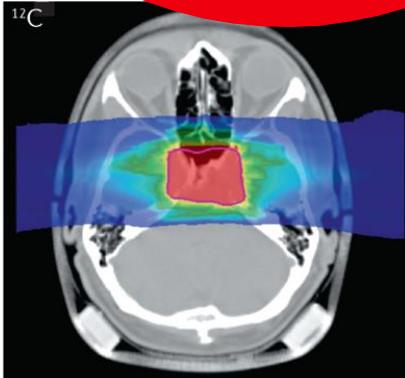
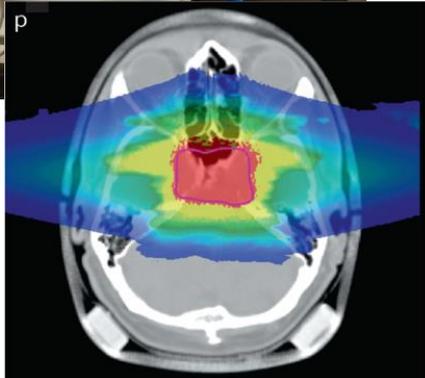
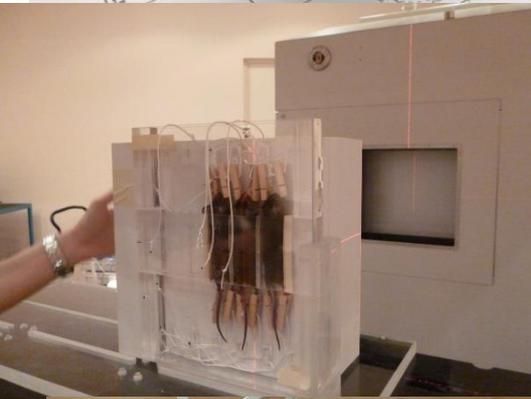
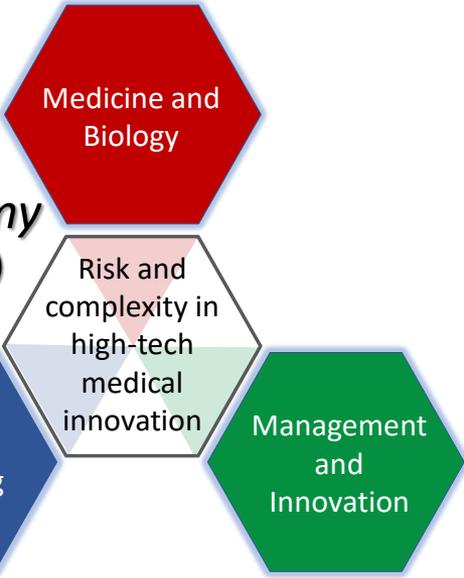
IR cameras for on-line
motion detection (100 Hz)

Positioning mechanical accuracy:
0.3 mm peak linear error in absolute positioning
0.1° peak rotational errors in absolute positioning



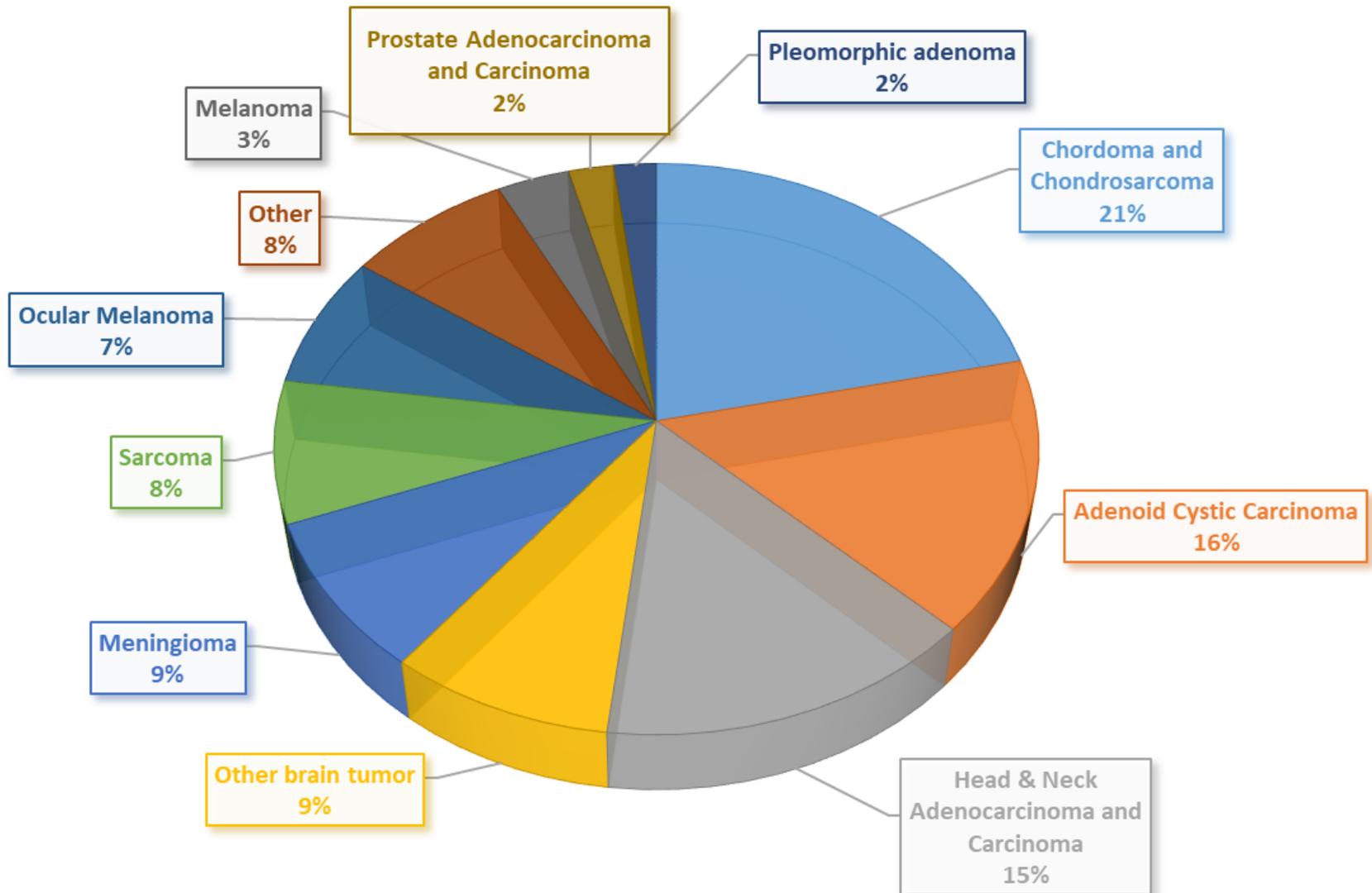


The Hadron Academy (PhD Courses IUSS-CNAO)



CNAO: >4100 patients

54% carbon ions- 46% protons



Collaboration Agreement CNAO - TERA 16/04/2015



RIASSUNTO OPERATIVO

PIANI DI SVILUPPO DEL CNAO DEVELOPMENT PLANS OF CNAO

31 January 2017

TERA Foundation

U. Amaldi, C. Cuccagna, A. Garonna and M. Vaziri Editors



Nel marzo 2015 il Consiglio della Fondazione CNAO approvò un documento che descriveva le future attività di ricerca della Fondazione e nell'aprile i Presidenti di CNAO e della Fondazione TERA firmarono un Accordo che affidava a TERA lo studio dettagliato di cinque nuovi Progetti per il sito di Pavia:

1. installazione di due impianti a sala unica (in inglese, "single-room facilities") per l'adroterapia con protoni,
2. costruzione di una nuova sala sperimentale molto più ampia di quella attuale,
3. installazione del ciclotrone da 18 MeV dell'Università di Pavia e di una radiofarmacia,
4. installazione dell'impianto per la Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) costruito dall'INFN,
5. studio di una testata rotante innovativa da utilizzare con fasci di ioni carbonio.

* * *

Quando, nel 2004, TERA passò alla CNAO i piani di costruzione del Centro, erano previste due fasi. La prima fase prevedeva la costruzione della struttura attuale, il cui sincrotrone tratta pazienti con ioni carbonio e protoni. Per la seconda fase era prevista l'aggiunta di due testate rotanti per ioni carbonio lunghe 25 m (Figura 1, p. 17).

Oggi lo spazio lasciato disponibile per le due testate si chiama "Area A". Inoltre, nella progettazione del Centro la Fondazione CNAO ha lasciato liberi 3500 m² (detta "Area B") per i futuri sviluppi (Figura 2, p. 17)

Poco dopo la firma dell'Accordo, CNAO e TERA decisero che l'Area A ospiterà i Progetti 1, 2 e 5 e l'Area B ospiterà i Progetti 3 e 4.

* * *

Nell'aprile del 2016 fu chiesto a TERA di anticipare le conclusioni raggiunte presentando un Rapporto intermedio in modo che il Consiglio fosse informato dei lavori in corso e la Fondazione CNAO potesse discutere gli aspetti tecnici con i partner interessati ai diversi progetti passando dalla fase di concezione alla realizzazione, in particolare dei Progetti 1 e 2.

A seguito di questa richiesta, un Rapporto preliminare di 150 pagine è stato distribuito e presentato al Consiglio il 29 giugno 2016. Nei mesi successivi, TERA ha raccolto le informazioni mancanti sull'impianto-sala-unica ProTom (progetto 1) e sul progetto 4, per il quale si sono tenute a Pavia e a Legnaro diverse riunioni – con gli scienziati e gli ingegneri della CNAO, dell'Università di Pavia e dell'INFN – che hanno portato a modifiche rilevanti rispetto a quanto previsto nel Rapporto preliminare.

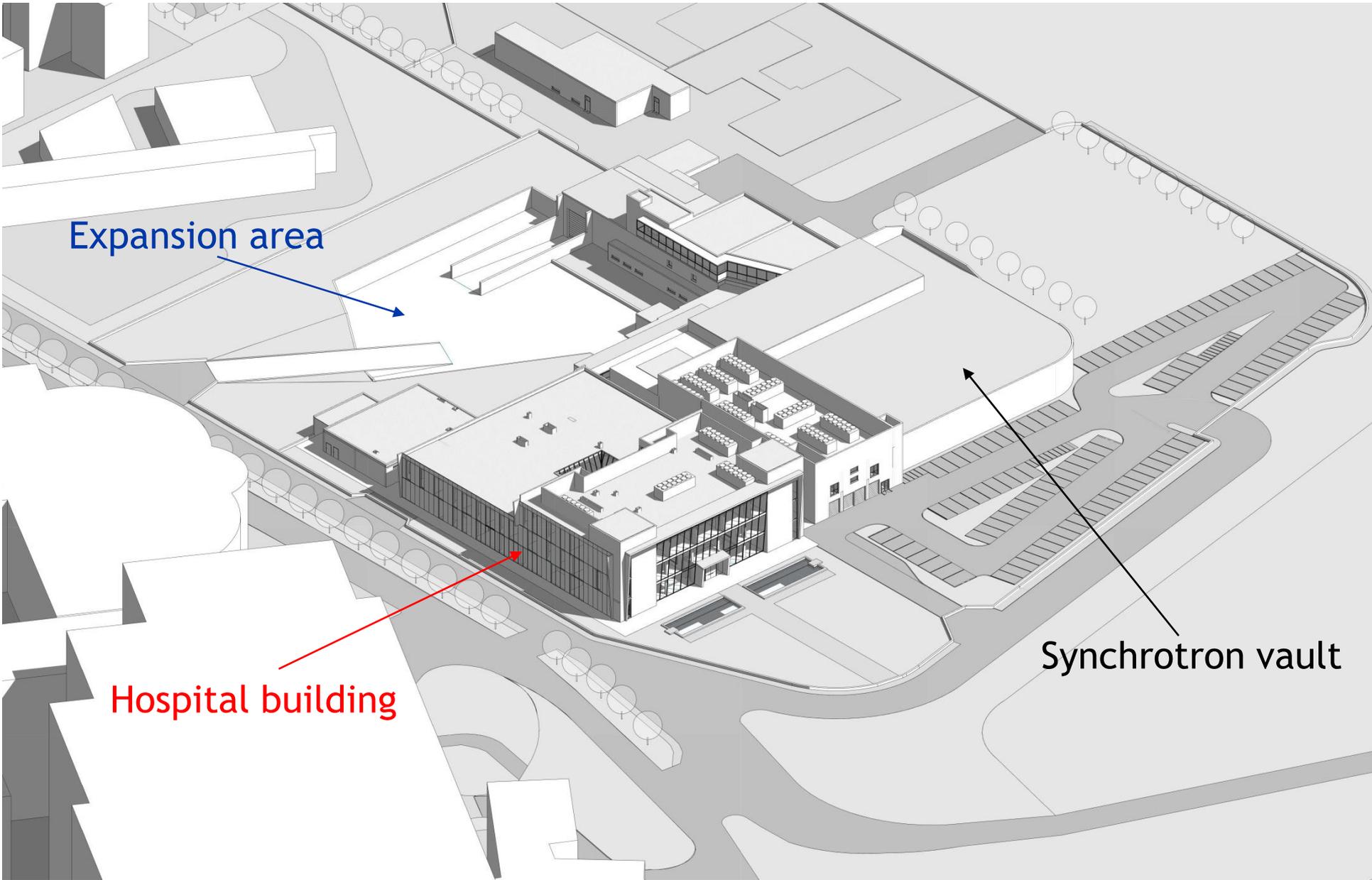
Questo Rapporto, che comprende e completa il materiale del Rapporto preliminare, è suddiviso in tre parti:

Parte A: "*Single-room facilities and new experimental area*",

Parte B: "*Radiopharmacy and BNCT*",

Parte C: "*Rotating gantries for carbon ion therapy*".

Present layout

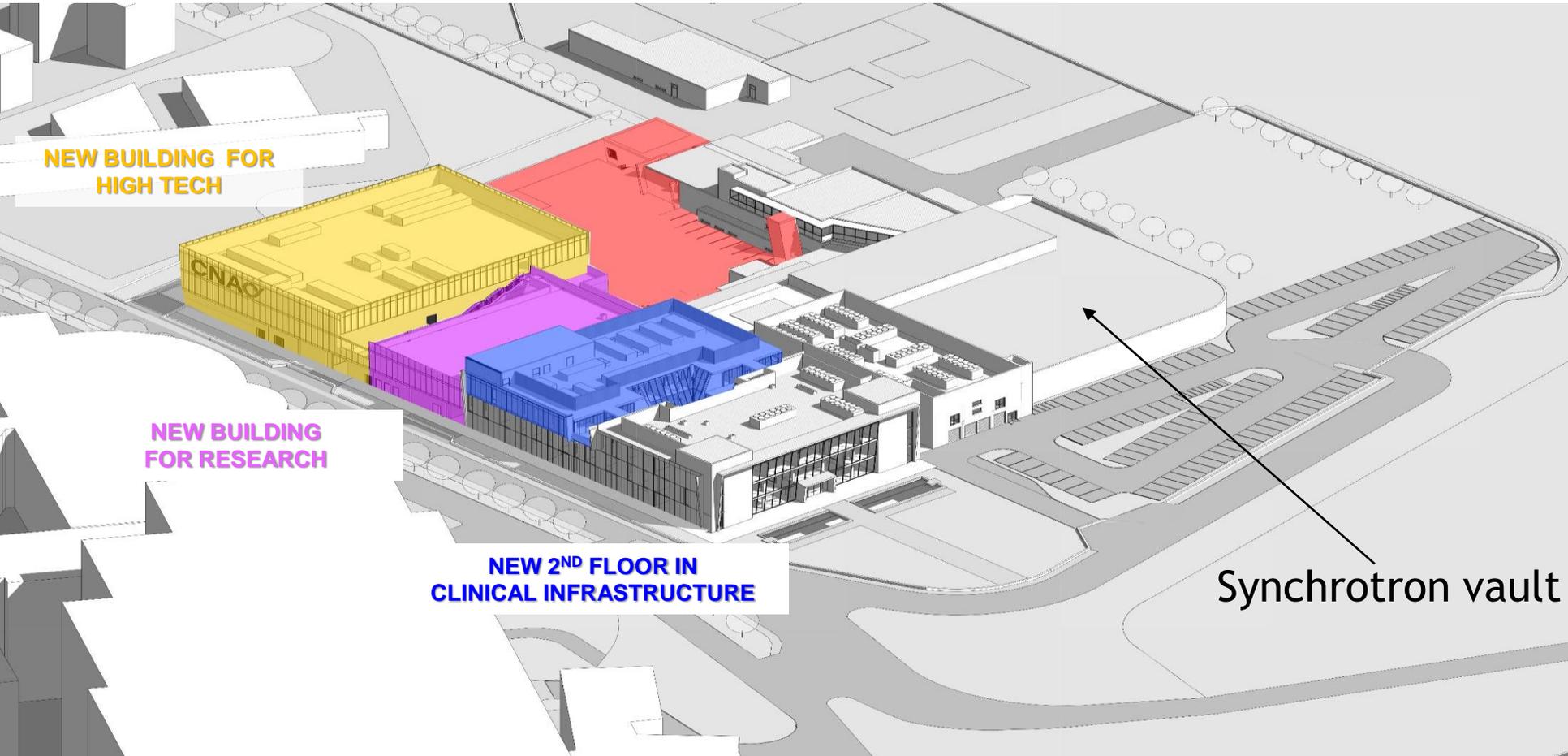


Expansion area

Hospital building

Synchrotron vault

CNAO 2.0



Layout end 2023

INSpIRIT: new ion source

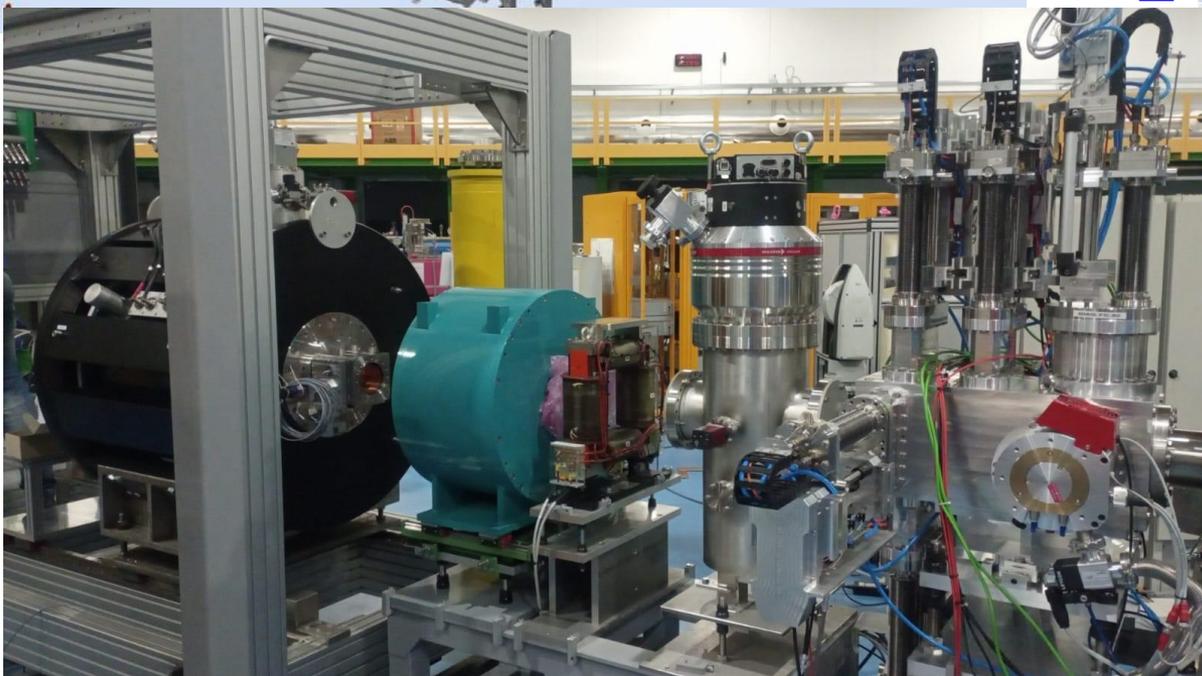
Collaboration CNAO-INFN-HiFuture



Expected currents

Ion	Supernanogan (14 GHz)	AISHa (18 GHz + TFH)
H ⁺	2000	4000
H ₂ ⁺	1200	2000
H ₃ ⁺	1000	1500
³ He ⁺	800	2000
¹² C ⁴⁺	250	800
⁶ Li ²⁺ - ⁷ Li ²⁺	//	800
¹⁰ B ³⁺ - ¹¹ B ³⁺	//	600
¹⁸ O ⁶⁺	400	1000
²¹ Ne ⁷⁺	120	500
³⁶ Ar ¹²⁺	20	150

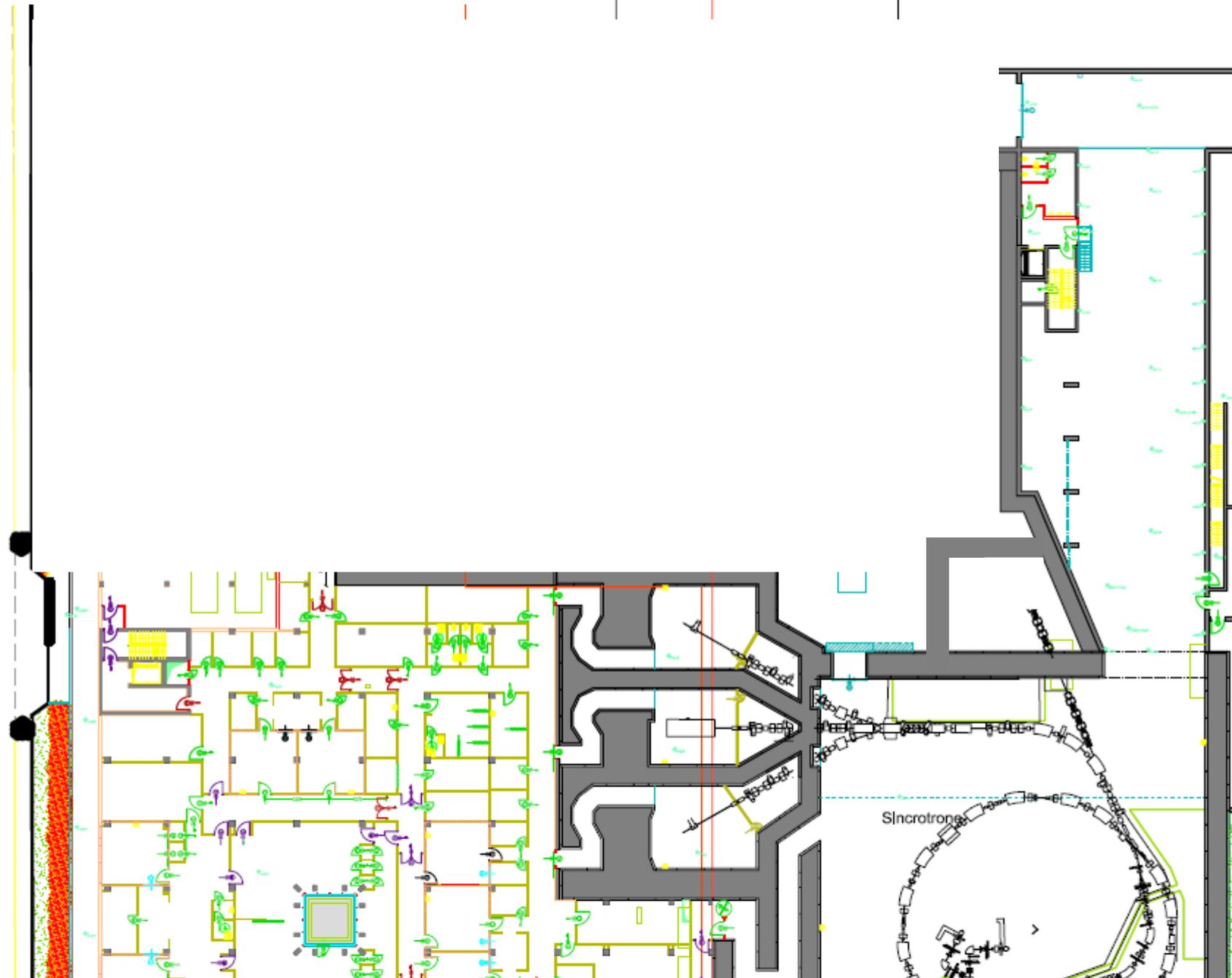
Ion beam production (eμA)



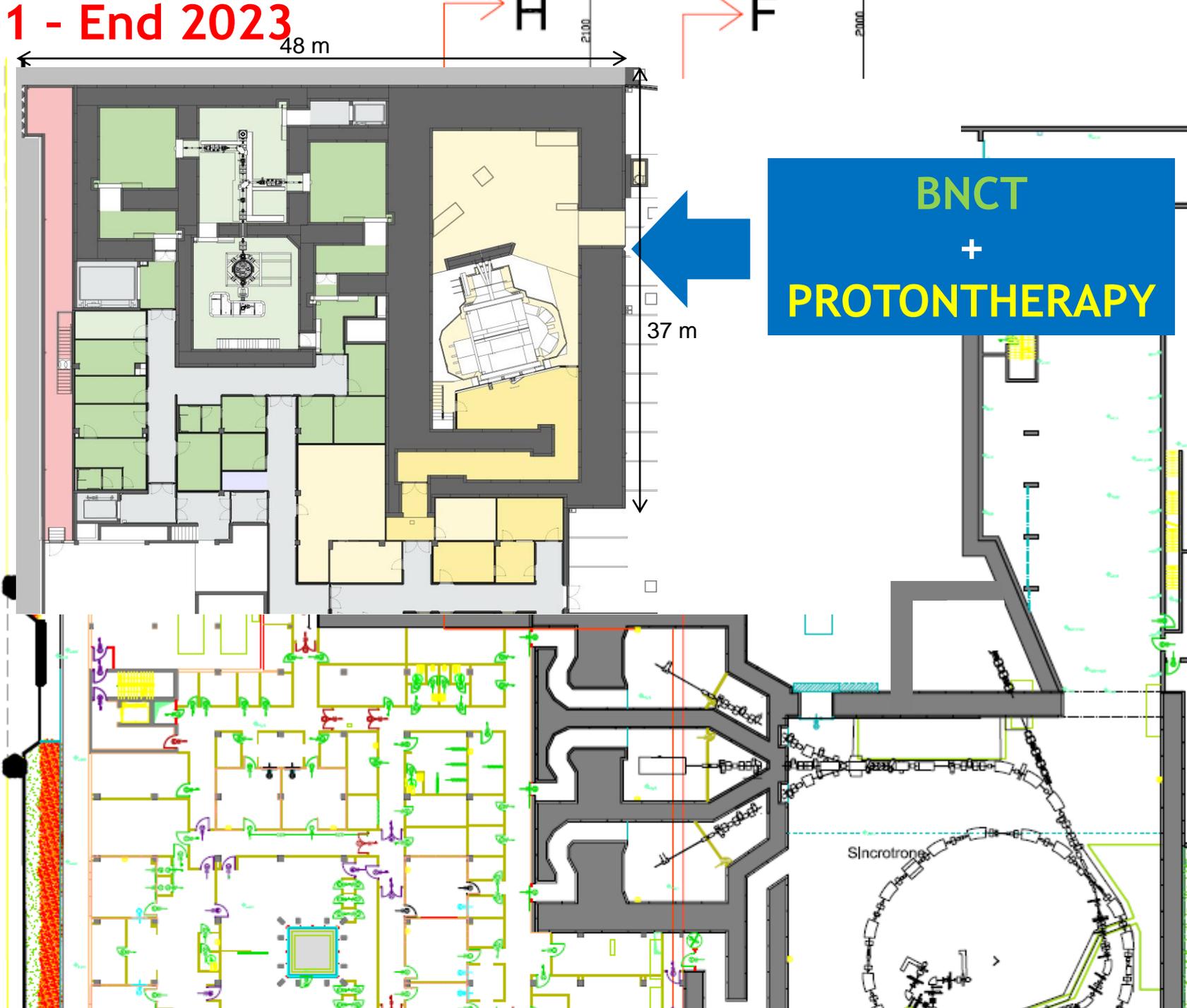
Status: ongoing installation and commissioning

Ready end 2022

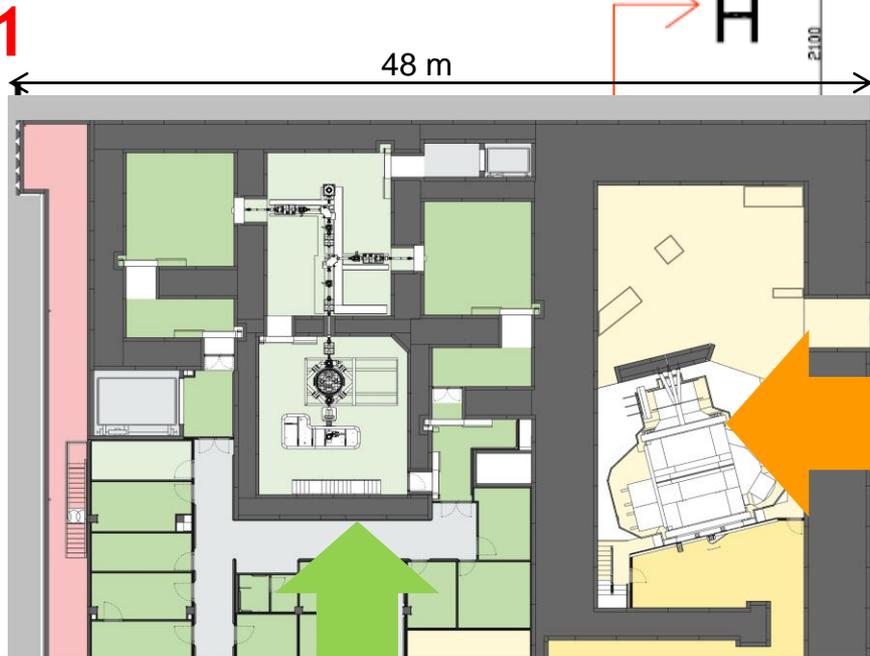
Level -1 - Present situation



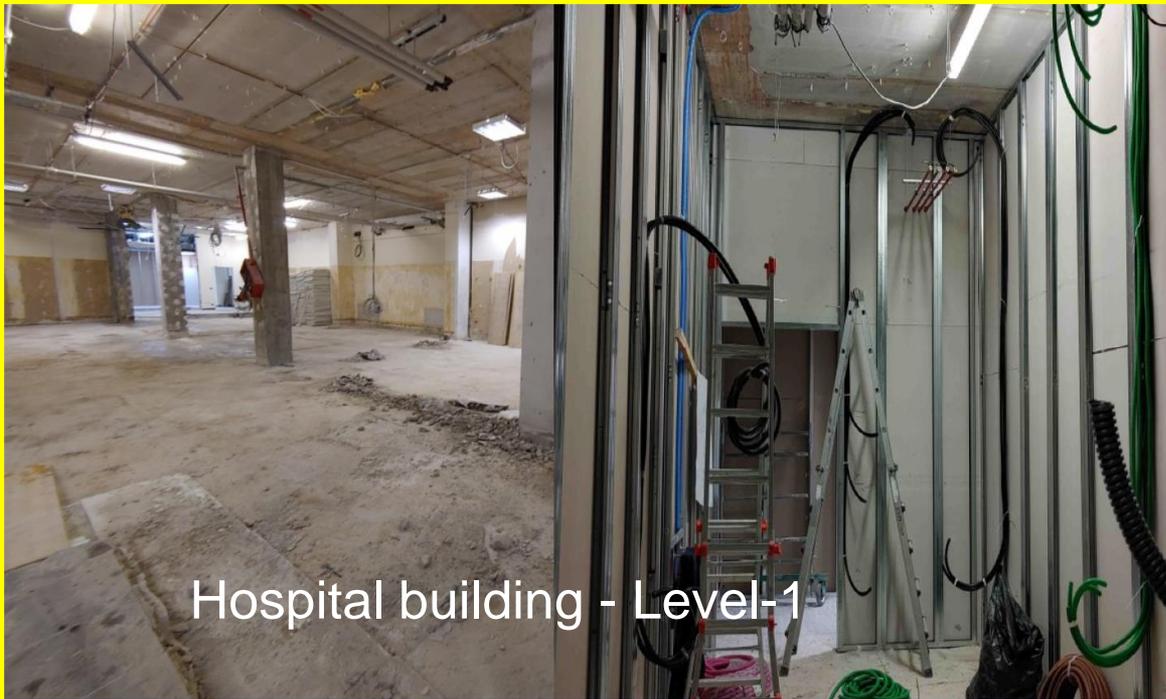
Level -1 - End 2023



Level -1



Installation of high-tech starts fall 2023



Hospital building - Level-1



Hospital building – Level 2



New building - excavation work

*Beginning
September 2022*

From TERA experience what I (we) have learned



Resilience - “Ci vuole pazienza”



Prominence of scientific approach to problems



Precision and attention to details



Collaboration spirit



Take care of persons



Ethical attitude

TERA Foundation: A SCHOOL OF LIFE !



Thank you

"Real progress happens only when advantages of a new technology become available to everybody"
H. Ford