

La fisica con i fasci di nuclei radioattivi ed il progetto della “facility” italiana SPES presso i Laboratori Nazionali di Legnaro

Fasci di nuclei radioattivi - RNB/RIB



Frontiera di ricerca nei prossimi ≥ 20 anni

Perché?

Per la più semplice risposta basta soltanto andare indietro di 90 anni



Prima “trasmutazione” artificiale



1932-2000  Fasci di quasi tutte le specie nucleari stabili

p  U

L'esistenza dei nuclei è limitata da tre frontiere:

- 1) limite nel numero di neutroni per fissato Z
- 2) limite nel numero di protoni per fissato N
- 3) limite nel numero di massa A

~ 300 nuclei stabili

~ 2500 nuclei prodotti in Laboratorio

prevista l'esistenza di ~ 6000 nuclei

Fasci radioattivi  Superamento del principale limite negli studi di Fisica Nucleare negli scorsi decenni, consistente nel fatto che in qualsiasi reazione nucleare sia il fascio che il bersaglio dovevano essere stabili.

I nuclei esotici possono essere essi stessi oggetto di studio o venire usati per produrre, attraverso reazioni, nuclei ancora più esotici.

Aumento del ~~numero~~ di nuclei noti

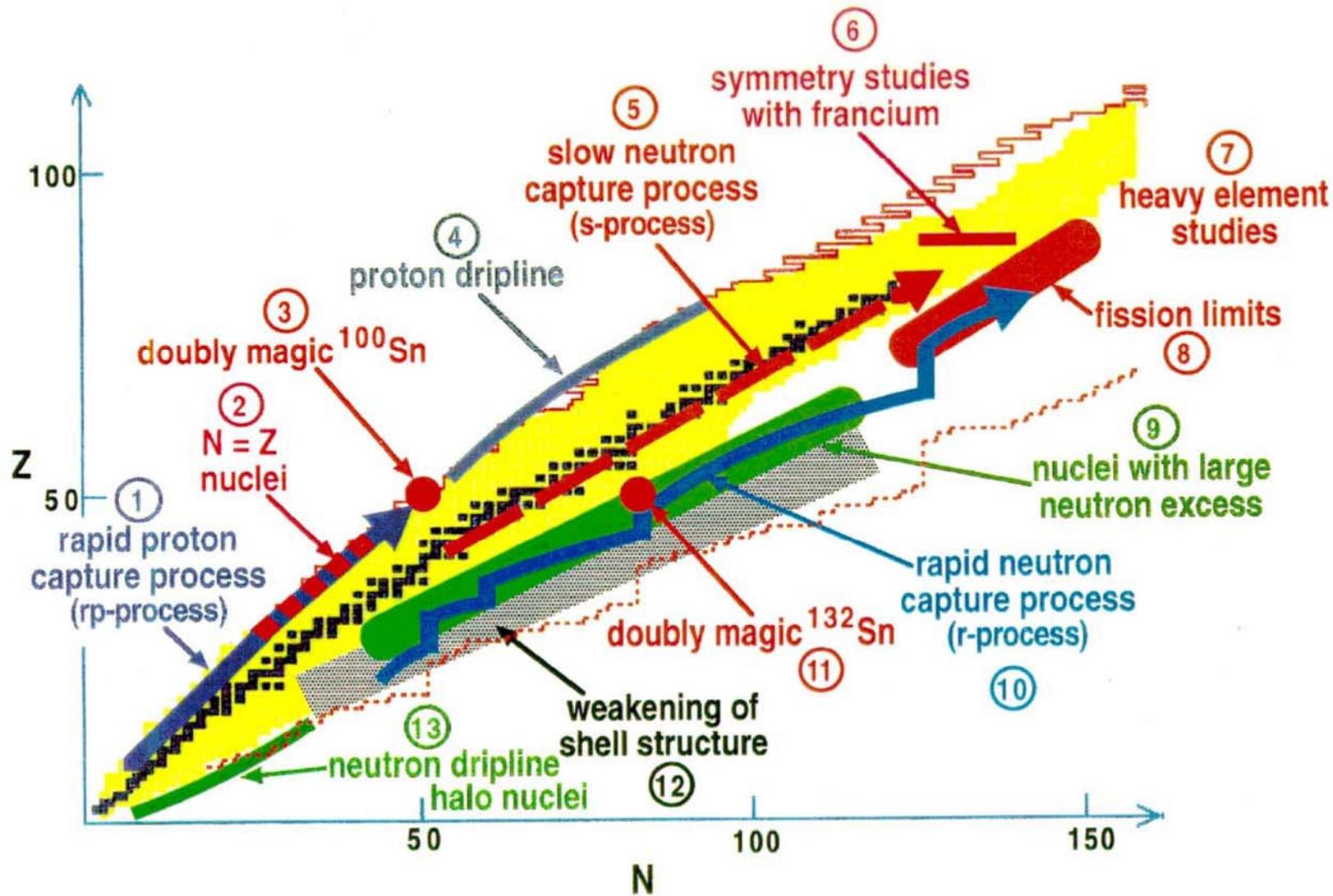
Combinazioni molto asimmetriche di protoni e neutroni

→ **Condizioni estreme di isospin**

→ **Nuova Fisica**

Tema centrale nella Fisica Subnucleare: “beyond the Standard Model”

Tema centrale nella Fisica nucleare: “Beyond the Standard Nuclear Matter” mediante l’uso di fasci di nuclei radioattivi



Nucleosynthesis in the Cosmos

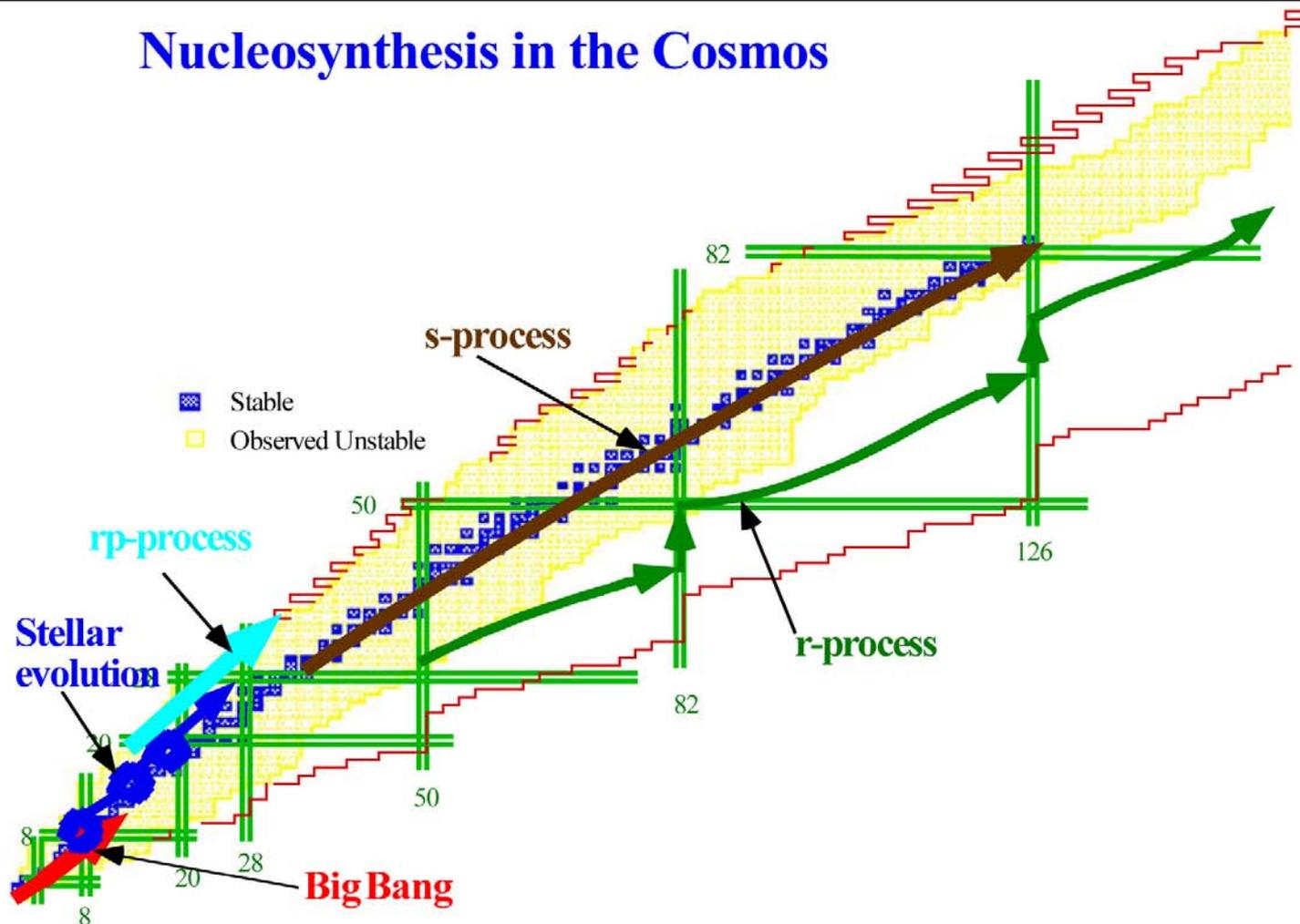


Fig. 6 All elements in the universe have been synthesized by series of nuclear reactions and nuclear decays in many different times and sites throughout the evolution of the universe. Neutron capture reactions create successively heavier nuclei, leading to heavier and heavier species. Several processes occur and compete: These are indicated by the arrowed curves in the figure. Trajectories in the nuclear chart, followed by these nucleosynthetic reactions pass through regions far from stability and thus could not be studied previously. RNBs provide an opportunity to study those reactions in terrestrial laboratories for the first time.

Key Science Questions

- ◆ Qual'è l'origine degli elementi nell'Universo e quali sono i processi nucleari che determinano il destino delle stelle e che conducono alla sintesi degli elementi di cui siamo costituiti?
- ◆ Quali combinazioni di neutroni e protoni possono formare un nucleo?
- ◆ Quali sono le proprietà dei nuclei con rapporti estremi neutroni-protoni?
- ◆ Quali sono le proprietà della materia nucleare con grande eccesso di neutroni in condizioni estreme di temperatura e densità?
- ◆ Quali cambiamenti si devono avere nei modelli teorici per descrivere le proprietà di nuclei con grandi eccessi di neutroni o di protoni?
- ◆ Come sono legate le proprietà dei nuclei all'interazione elementare nucleone-nucleone?

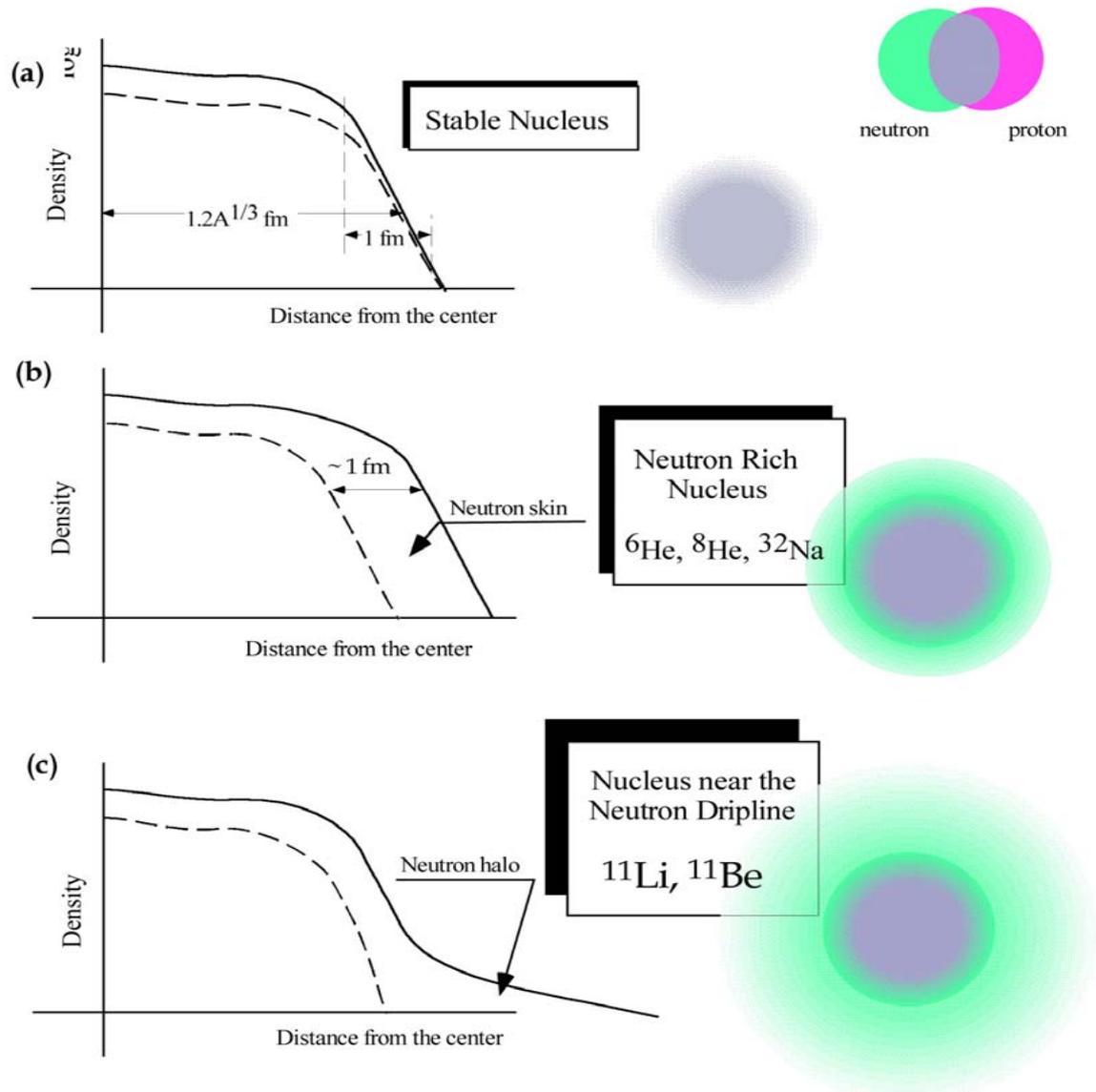
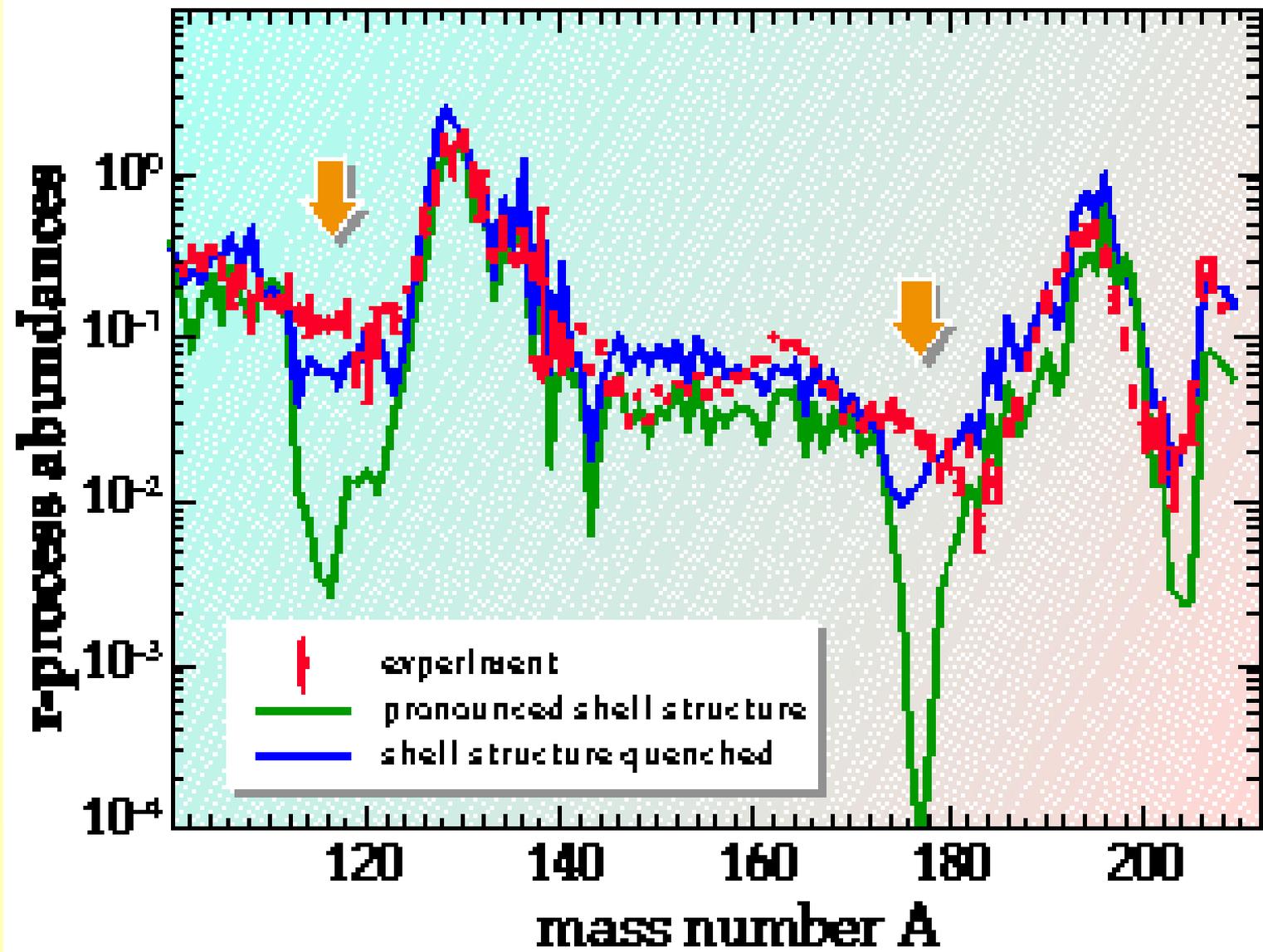


Fig. 4 Nuclei near the stability line are tightly bound, the proton and neutron spatial distributions are thoroughly mixed, and the nuclear radius is proportional to $A^{1/3}$ in all mass ranges. However, unstable nuclei break these rules and show new features. For example, in light neutron rich nuclei near the drip line, protons and neutrons are decoupled and the extra neutrons form a layer on the surface of such nuclei called a neutron halo. In heavier nuclei near the neutron drip line, a low density but thick layer of neutrons, called a neutron skin, surrounds the nucleus.

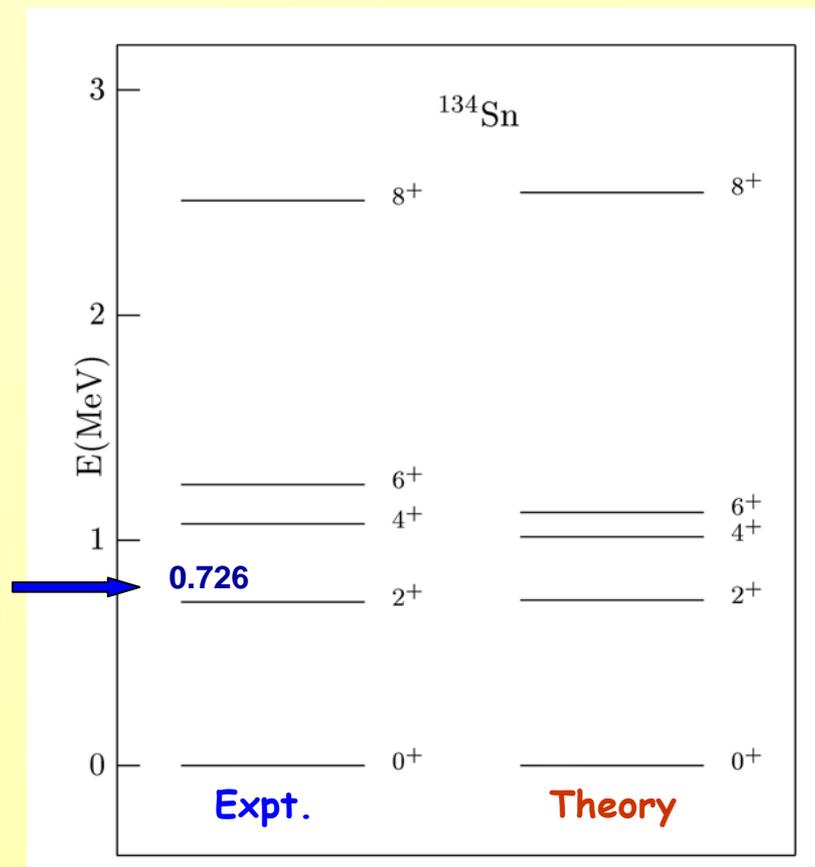


	^{124}Sn (stable)	^{136}Te	^{137}Te	^{134}Sb	^{135}Sb	^{136}Sb	^{134}Sn	^{136}Sn (unknown)
Z	50	52	52	51	51	51	50	50
N	74	84	85	83	84	85	84	86
N/Z	1.48	1.61	1.63	1.63	1.65	1.67	1.68	1.72



^{134}Sn è attualmente il nucleo più esotico al di là del ^{132}Sn per il quale si hanno informazioni su stati eccitati

N/Z=1.68



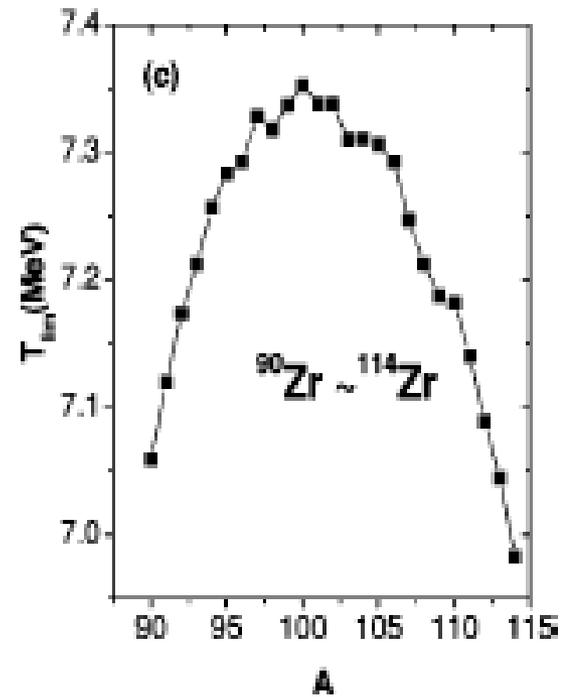
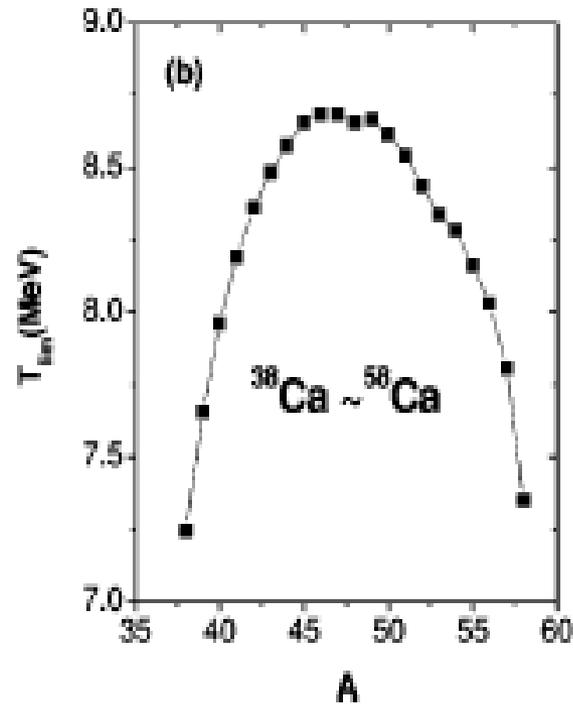
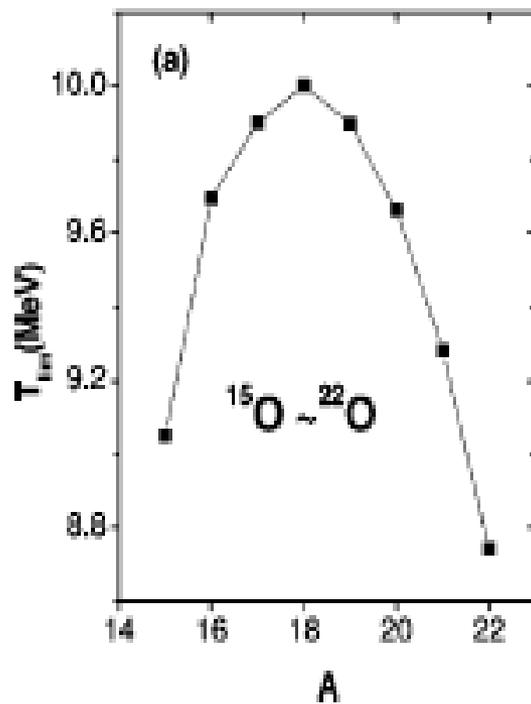
Lowest first-excited 2^+ level in semi-magic even-even nuclei over the whole chart of nuclei

^{134}Sn Coulex (Oak Ridge)

$$B(E2;0^+ \rightarrow 2^+) = 0.029(4) e^2b^2$$

Theory

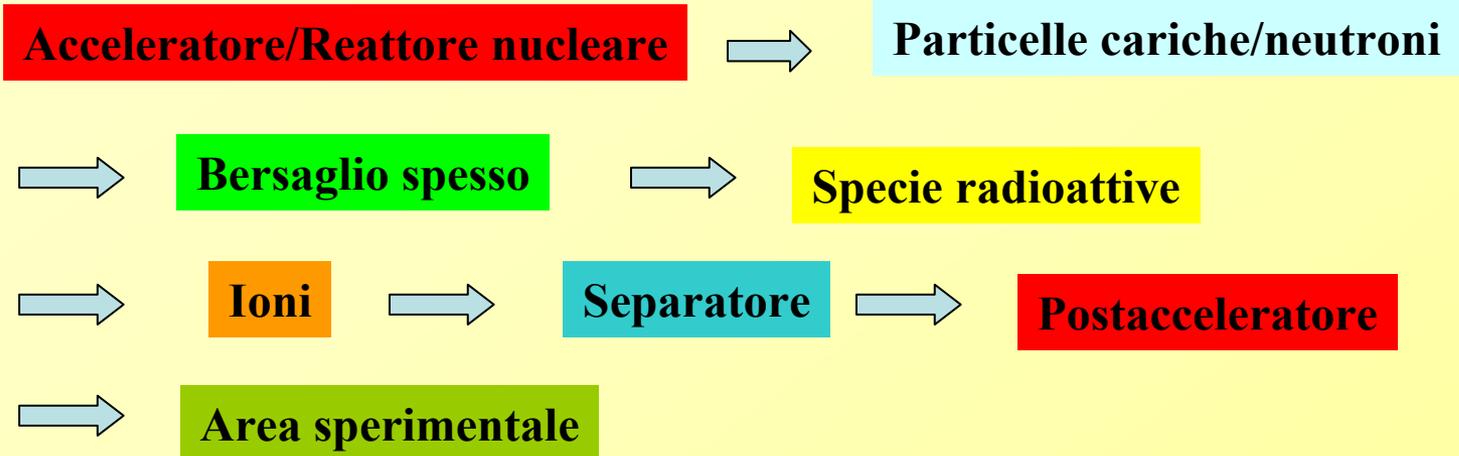
$$B(E2;0^+ \rightarrow 2^+) = 0.033 e^2b^2$$



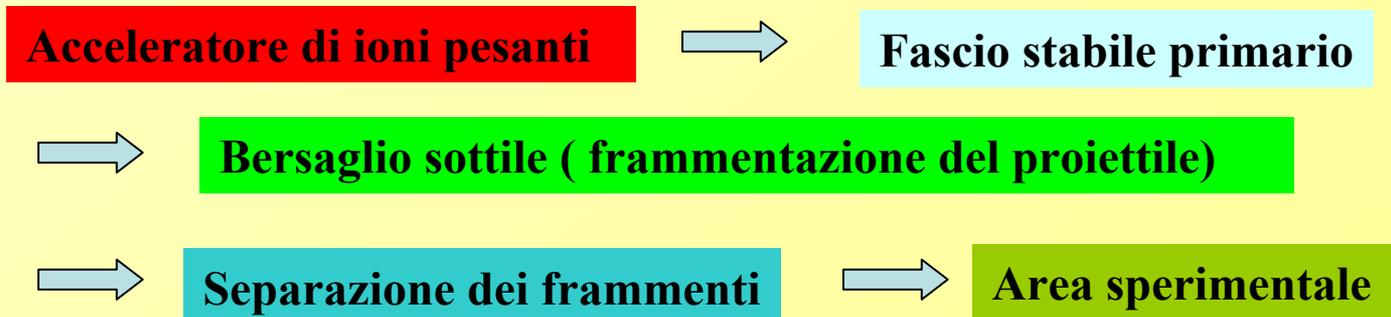
Combinazioni proiettile/bersaglio con rapporti N/Z molto differenti
 → Effetti di isospin sulla temperatura limite.

Produzione di fasci radioattivi (2 Metodi)

1. ISOL (Isotope Separation On Line)



2. In-flight (Frammentazione del proiettile)



Metodo ISOL: Fasci di alta qualità anche a basse energie. Limitato per l'accelerazione di isotopi di breve vita media (10-100 ms)

Metodo In-Flight: Tempo di separazione molto breve, circa 10 ns. Qualità dei fasci limitata. In particolare, non si possono ottenere fasci di buona qualità a basse energie.



Complementarità dei due metodi



Selective Production of Exotic Species

- [SPES Study Group](#)
- [SPES Steering Committee](#)

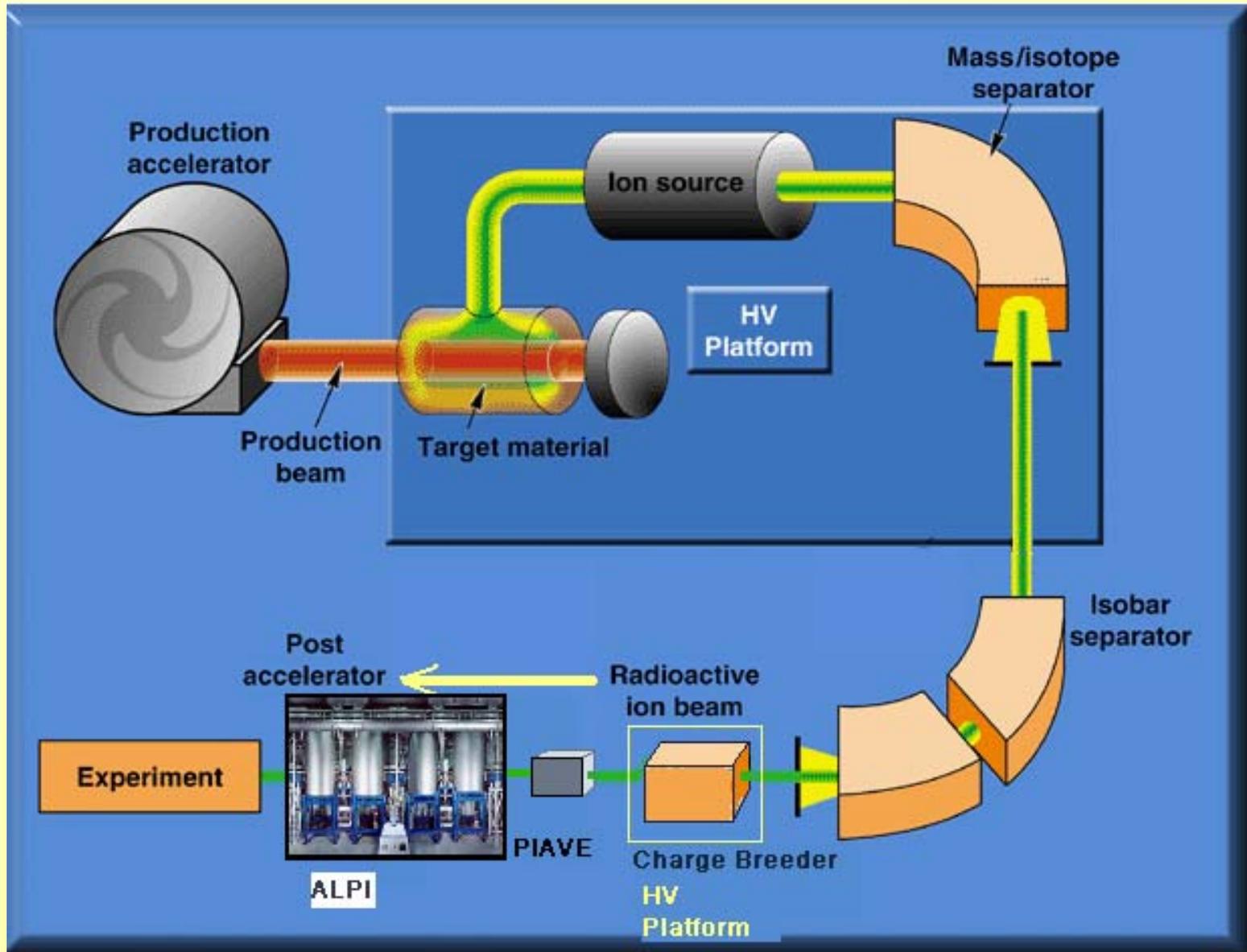


- [SPES-BNCT](#)

DOCUMENTS

- [Project Study – June 1999](#)
- [Technical Design Report – June 2002](#)
- [Technical Design Report – July 2007](#)
- [Technical Design Report – 2008](#)
- [Executive Summary 2008](#)

ISOL facility scheme



Neutron Facility: BNCT – LENOS
Thermal neutrons $10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutrons 10^{14} n s^{-1}

TRASCO RFQ: protons 5MeV 25mA

Direct Target 10^{13} f s^{-1} Mass Separator
(on HV platform 250KV)

Charge Breeder (10KW) installed over HV platform (250KV)

Cyclotron: protons
70 MeV 0.75mA

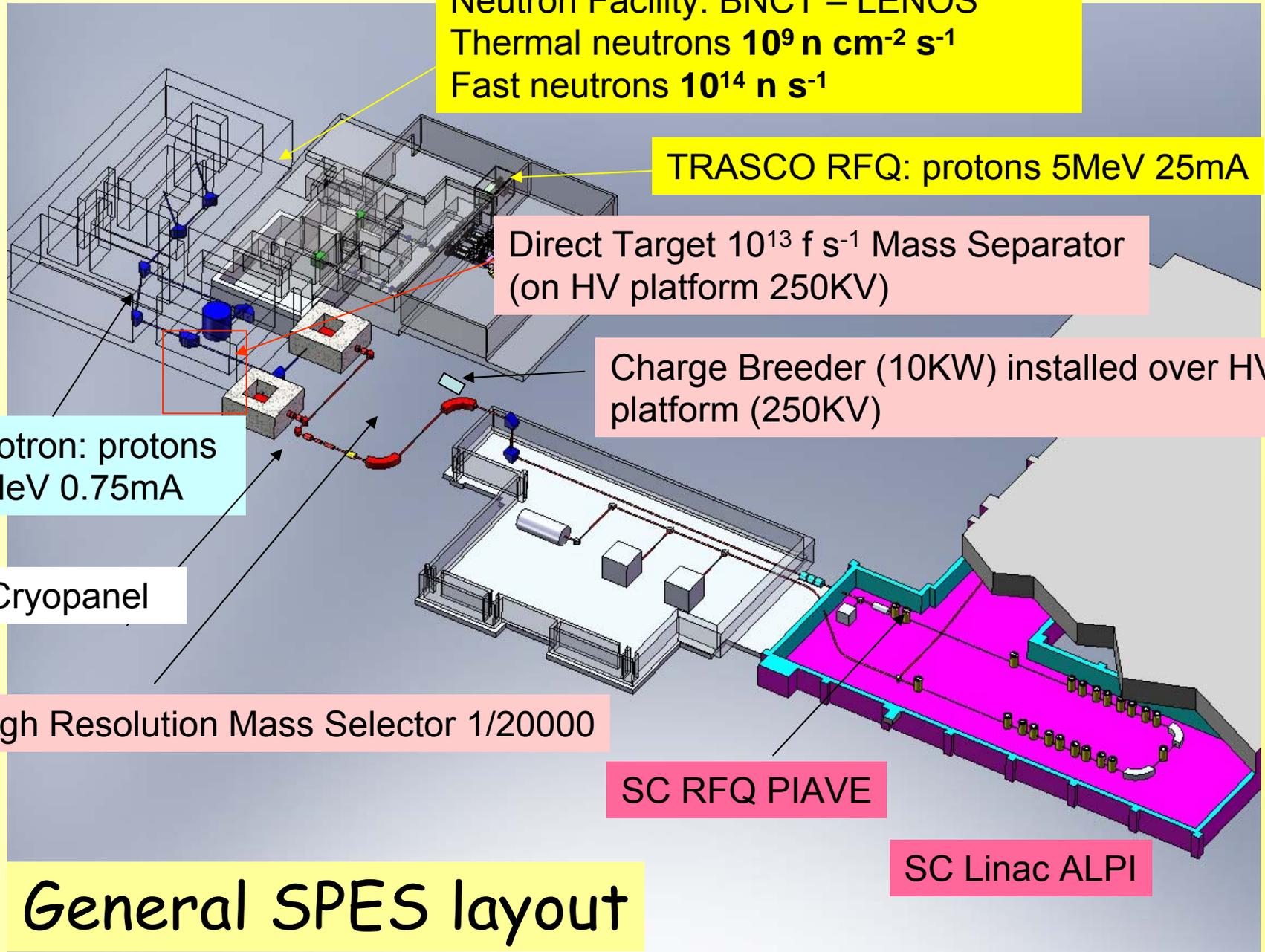
Cryopanel

High Resolution Mass Selector 1/20000

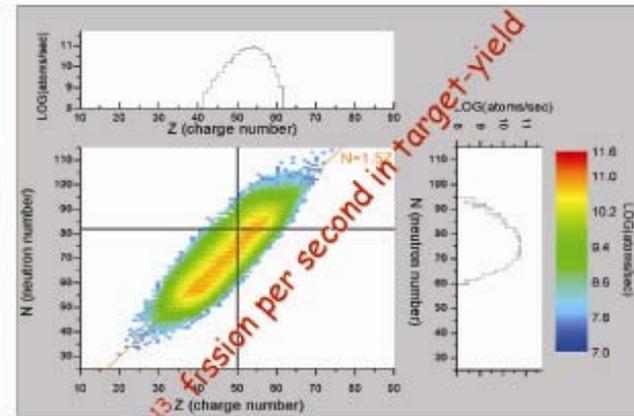
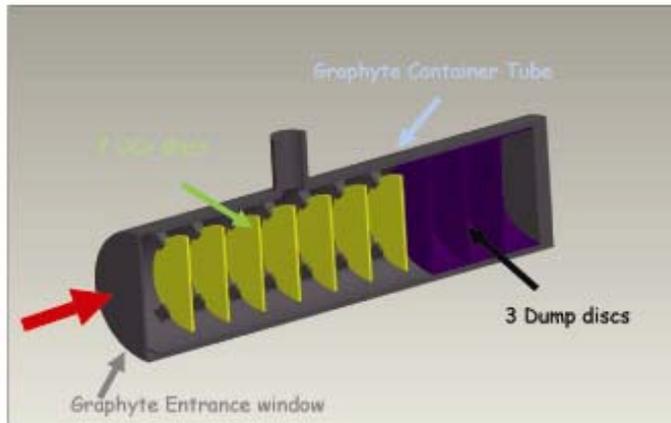
SC RFQ PIAVE

SC Linac ALPI

General SPES layout



The Spes Direct Target



- Proton Beam = 40 MeV , I= 0.2 mA
- The window is made by a thin graphite foil of 400 μ m
- The UCx disc is made by 7 disks with the following thicknesses: 1.4 mm, 1.4 mm, 1.4 mm, 1.3 mm, 1.3 mm, 1.3 mm, 1.2 mm (Uniform Beam loss). The total mass is 30 g;
- The beam dump is made by 3 graphite disks thicknesses: 0.8 mm, 0.7 mm, 1 mm.
- The box containing the disks is made of graphite.
- All target system is placed inside a stainless steel vacuum chamber

Laboratori Nazionali di Legnaro

First beam 2013-2014

SPES Area

Exp Hall

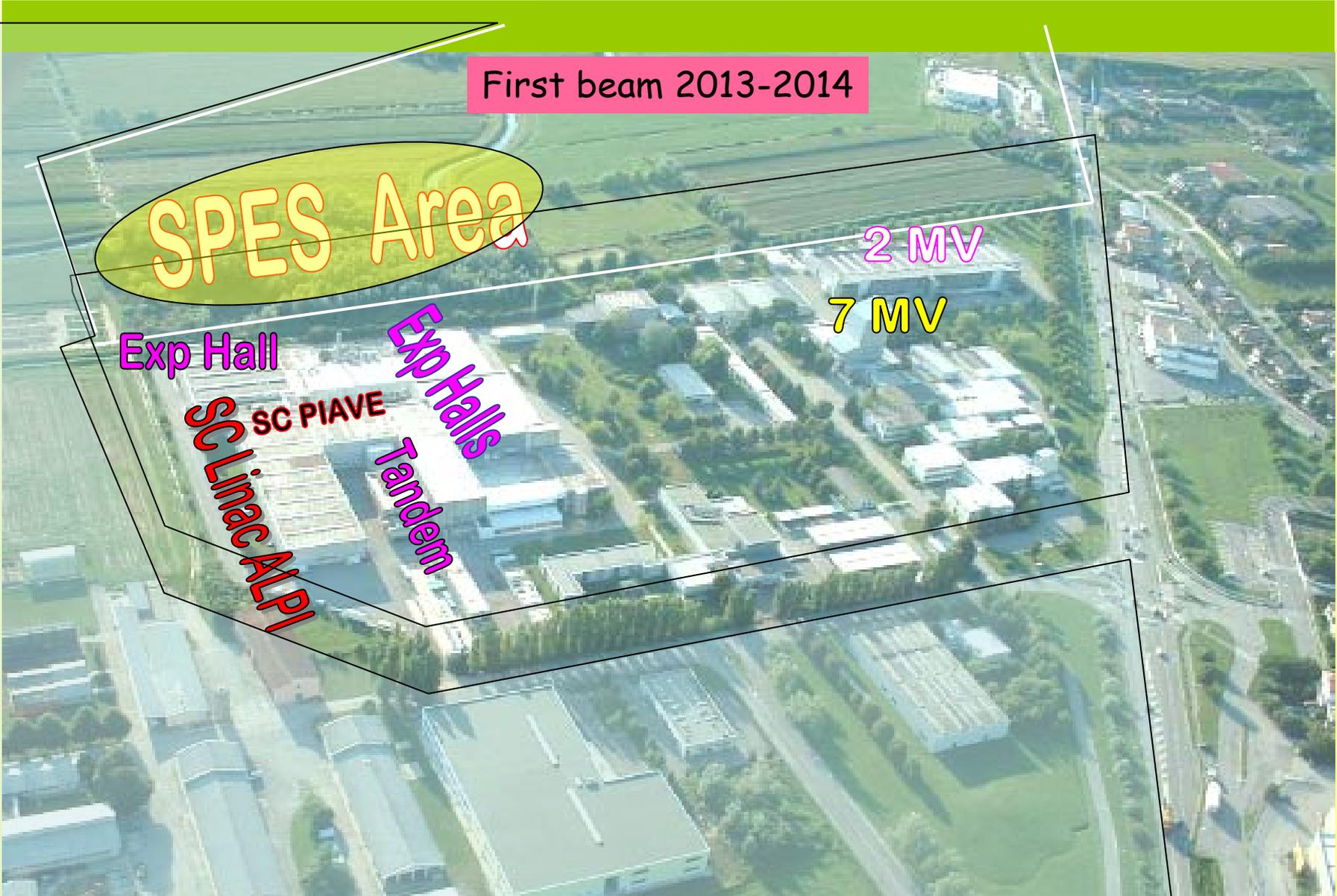
SC PIAVE

ALPI
Linac

Exp Halls
Tandem

2 MV

7 MV



Neutron Rich Beam at SPES

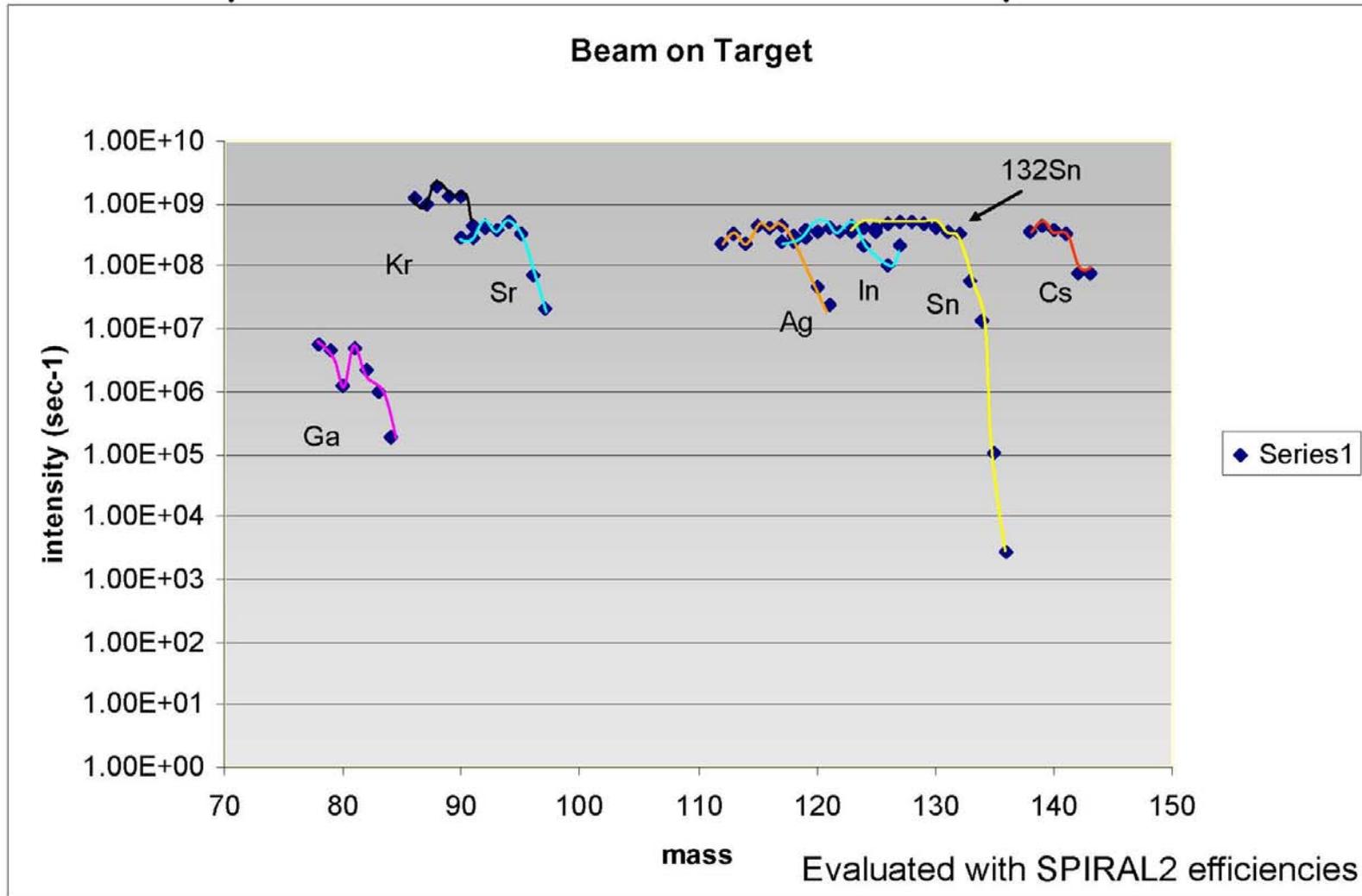
Element	Mass	Intensity (1/s)	Ionization Eff (%)	Target	Source	R&D (difficulty)
Ni	65-69	10^{+6}	6	UCx	LIS	**
Cu	66-76	10^{+6}	7	UCx	LIS	**
Zn	72-79	10^{+6}	5	UCx	LIS	**
Ga	72-84	10^{+6}	20	UCx	LIS	**
Ge	75-84	10^{+7}	3	UCx	LIS	***
Rb	86-94	10^{+9}	65	UCx	SIS	*
Sr	89-96	10^{+8}		UCx	SIS+LIS	***
Y	90-97	10^{+7}		UCx	LIS	****
Pd	111-118	10^{+7}		UCx	LIS	****
Ag	110-120	10^{+8}	14	UCx	LIS	**
Cd	115-124	10^{+8}	10	UCx	LIS	**
In	116-128	10^{+8}	15	UCx	SIS+LIS	**
Sn	123-134	10^{+9}	15	UCx	LIS	**
Sb	124-135	10^{+8}	3	UCx	LIS	***
Te	129-138	10^{+7}		UCx	LIS	****
Cs	134-144	10^{+9}	85	UCx	SIS	*
Ba	139-146	10^{+8}		UCx	SIS+LIS	***
La	141-145	10^{+6}		UCx	SIS+LIS	***

About 154 n-rich RIB species will be available!

Waiting point nuclei che possono essere prodotti a SPES

				SPES beam	Half-life	Beam intensity [s ⁻¹]
N=50				⁸⁰ Zn	0.55 s	~10 ⁴
				⁸¹ Ga	1.22 s	3×10 ⁴
				⁸² Ge	4.6 s	2×10 ⁴
				⁸³ As	13 s	10 ⁴
				⁸⁴ Se	3.3 s	~10 ⁴
				⁸⁵ Br	2.87 s	5×10 ⁷
N=82				¹³⁰ Cd	0.2 s	~10 ⁵
				¹³¹ In	0.3 s	2×10 ⁶
				¹³² Sn	40 s	8×10 ⁵
				¹³³ Sb	2.5 m	7×10 ⁵
				¹³⁴ Te	42 m	5×10 ⁶
				¹³⁵ I	6.57 h	8×10 ⁷
Dati nucleari: Masse, vite medie per decadimento β, probabilità di emissione di neutroni ritardati, sezioni d'urto per cattura neutronica						

Expected SPES Beams available for experiments



SPES Organization

Steering Committee

La Rana, Pirrone, Colonna, Million, Bruno, Lunardi,
Corradi, Casini, Cuttone, Alba

Project Manager

G.Prete

Secretary

Budget control

Technical Coordinator

A.Pisent

Scientific Coordinator

A.Covello

Radiation protection Procedures

D.Zafiropoulos

task		responsible
1	Safety Radiation protection Control system	F.Gramegna
2	Infrastructure	P.Favaron
3	Direct Target RIB Sources, Beam Test	A. Andrighetto
4	RIB manipulation Charge Breeder, Spectrometer	L.Calabretta (interim)
5	High Intensity Proton Driver Neutron Facility and BNCT	A.Pisent
6	Re-accelerator	G.Bisoffi
7	High Energy Proton Driver	A. Lombardi

TDR2008

1) Struttura nucleare

Struttura a shell lontano dalla stabilità – Simmetrie nucleari al punto critico - Momenti nucleari - Risonanze dipolari giganti – Alti spin nei nuclei deformati

2) Reazioni nucleari

Reazioni di trasferimento di uno o più nucleoni - Fusione

3) Astrofisica nucleare

Origine degli elementi – Dati nucleari necessari per il calcolo delle abbondanze

4) Nuclei “caldi”

Densità dei livelli - Dinamica e Termodinamica dei sistemi esotici - Oscillazioni dinamiche di dipolo



First SPES Physics Workshop

October 29-30, 2008

Laboratori Nazionali di Legnaro
Sala riunioni VILLI

Programma

MERCOLEDI' 29 OTTOBRE

9.00 - 9.10	A. Covello (Napoli): Apertura
9.10 - 9.20	G. Puglierin (LNL)
9.20 - 9.30	M. Lattuada (LNS)
9.30 - 9.55	D. Rifuggiato (LNS): Stato attuale e prospettive della "facility" EXCYT
9.55 - 10.20	G. Prete (LNL): Stato attuale e prospettive del Progetto SPES
10.20 - 10.40	E. Fagotti (LNL): Accelerator-driven high intensity neutron source for BNCT
10.40 - 11.10	<i>Coffee break</i>
11.10 - 11.25	L. Biassetto (LNL): Il bersaglio SPES: ricerca, sviluppo e prospettive future
11.35 - 11.50	G. de Angelis (LNL): Shell structure in exotic nuclei with SPES
12.00 - 12.15	E. Farnea (LNL): Nuclear structure studies with Agata and Spes ^m
12.25 - 12.40	A. Gargano (Napoli): Shell structure of nuclei beyond ¹³² Sn
12.50 - 14.30	<i>Lunch</i>
14.30 - 14.45	A. Vitturi (Padova): Shape phase transitions and critical points in even and odd nuclei
14.55 - 15.10	L. Fortunato (Padova): Alpha-transfer reactions and mixed-symmetry states
15.20 - 15.35	G. Colò (Milano): Funzionali nucleari microscopici e stati di bassa energia
15.45 - 16.00	A. Stefanini (LNL): Fusione nucleare con fasci di ioni esotici
16.10 - 16.25	G. Potel (Milano): Reazioni di trasferimento di due nucleoni
16.35 - 17.00	<i>Coffee break</i>
17.00 - 17.15	G. Pollarolo (Torino): Transfer reactions at SPES - I
17.15 - 17.30	L. Corradi (LNL): Transfer reactions at SPES - II
17.40 - 17.55	A. Nannini (Firenze): Eccitazione colulombiana di nuclei ricchi di neutroni nella regione di massa A~150
18.05 - 18.20	D. Pierroutsakou (Napoli): Dipolo dinamico in reazioni dissipative tra ioni pesanti
18.35 - 18.45	A. Corsi (Milano): Dipolo dinamico in reazioni di fusione tra ioni pesanti
18.55	<i>Chiusura</i>

GIOVEDI' 30 OTTOBRE

9.00 - 9.10	G. Fortuna (LNL)
9.10 - 9.30	M. Pignatari (Keele, U.K.): Misure di MACS a LENOS: principali implicazioni in astrofisica
9.30 - 9.45	A. Pagano (LNS): Multifragment dynamical decay with Spes beams
9.55 - 10.10	G. Casini (Firenze): DIC con fasci esotici e stabili intorno a 10 AMeV: equilibratura dell'isospin e suo possibile effetto sui meccanismi di eccitazione nucleare
10.20 - 10.35	G. La Rana (Napoli): Particle evaporation from neutron-rich nuclei
10.45 - 11.00	N. Gelli (Firenze): Isospin effects on level density
11.10 - 11.30	<i>Coffee break</i>
11.30 - 11.45	E. Vardaci (Napoli): Ruolo dell'isospin nello studio della dissipazione nel canale di fissione
11.55 - 12.10	M. Colonna (LNS): Dissipative low energy collisions and symmetry energy
12.20 - 12.35	M. Di Toro (LNS): The dynamical dipole in fusion with exotic beams
12.45 - 13.00	M. D'Agostino (Bologna): Energia di simmetria e densita' dei livelli
13.10 - 14.30	<i>Lunch</i>
14.30 - 14.45	A. Bonasera (LNS): The isospin dependence of the nuclear equation of state near the critical point
14.55 - 15.30	Conclusioni e discussione
15.30	<i>Chiusura del Workshop</i>

- Oltre 70 partecipanti
- 22 contributi (9 teorici) : Bologna (1), LNS (4), Firenze (3), LNL (4), Milano (3), Napoli (4), Padova (2), Torino (1)

Some ISOL facilities towards EURISOL

	Primary beam	P on target	Target	Fissions/s
ISOLDE	p 1 GeV 2 μ A	0.4 KW	Direct or Convert.	$\sim 5 \times 10^{12}$
HRIBF	p 40 MeV 10 μ A	0.4 KW	DT	$\sim 5 \times 10^{11}$
TRIUMF	p 450 MeV	25 KW	DT (metal)	(Spallation)
EXCYT	¹² C 45 A MeV	0.4 KW	DT	1.5×10^4 ⁸ Li beam
SPIRAL2	d 40 MeV 5 mA ,	200 KW	Converter	$\sim 10^{13}$
SPES-DT	p 40 MeV 0.2 mA	8 KW	DT - Multislice	$\sim 10^{13}$

