

Jadrová fyzika

Rádioaktívne zväzky



Stabilné zväzky vs. RIB



- Zväzkov s využitím elementárnych častíc je veľmi málo. V podstate iba protóny, mióny, elektróny, neutróny, fotóny. Je snaha vytvoriť koncept intenzívnych neutrínových zväzkov cez kolimované zväzky beta-nestabilných izotopov.
- V prírode máme menej ako 300 stabilných izotopov, takže zväzkov so stabilnými jadrami je iba pár 100.
- Naproti tomu rádioaktívnych zväzkov môže byť pár 1000. Ich využitie však čelí problému s bezpečnosťou a intenzitou.

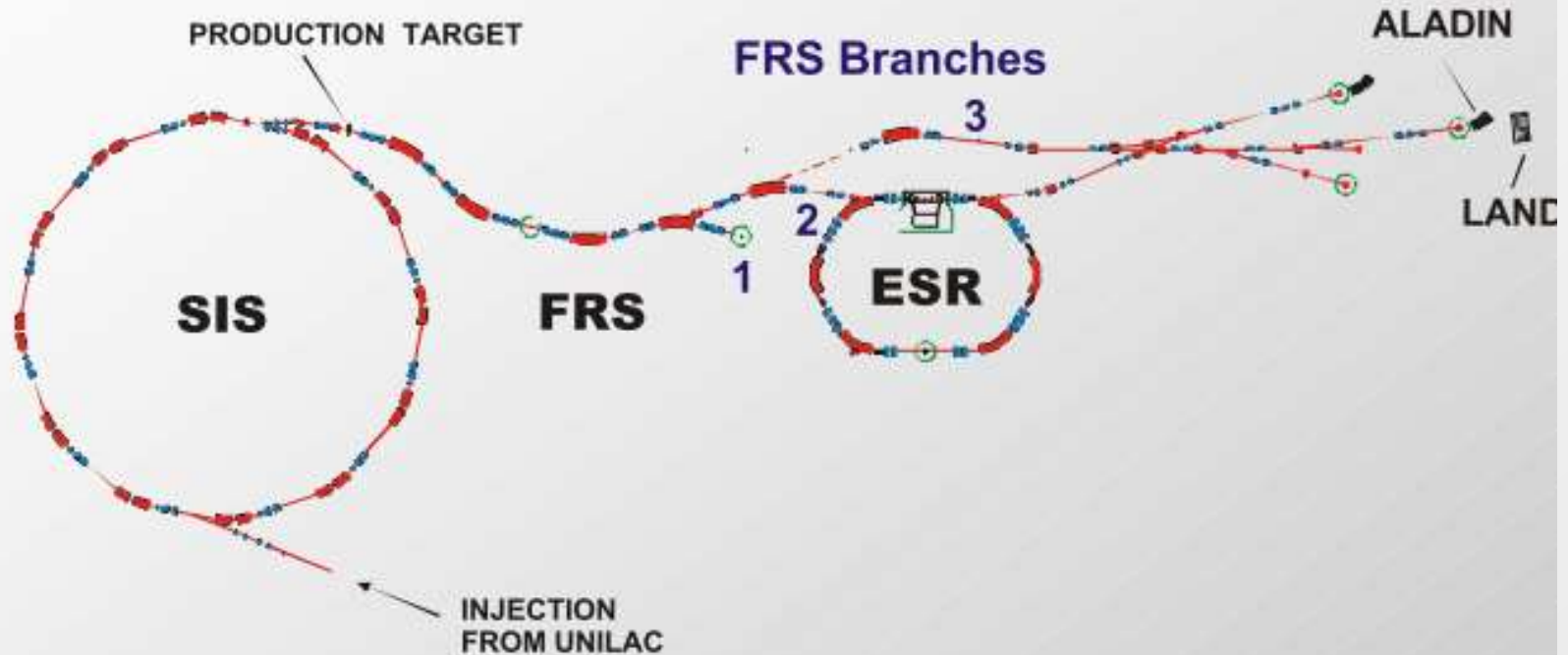
Fragmenty sú v oboch prípadoch separované a formované do rádioaktívneho zväzku.

V prípade ISOL metódy sa využíva dodatočné urýchlenie zväzku (dvoj-urýchľovačové zariadenia)



PRIELETOVÁ SEPARÁCIA RÁDIOAKTÍVNYCH ZVÄZKOV

Produkcia jadier fragmentáciou



Po urýchlení nalietaťujú na energie ~ 100 GeV/ u ťažké jadrá na terčik na ktorom prichádza k fragmentácii. Fragmentsy sú následne selektované systéomom elmag polí a nasmerované na jednotlivé experimenty.

Existujúce zariadenia



Hlavné experimenty s prietovými separátormi RA zväzkov.

Facility	Location	Driver	Primary energy	Typical intensity	Fragment separator
GANIL	Caen, France	Two separated sector cyclotrons	Up to 100 MeV u ⁻¹	³⁶ S 10 ¹³ pps ⁴⁸ Ca 2 × 10 ¹² pps	SISSI + ALPHA
GSI	Darmstadt, Germany	LINAC + synchrotron	Up to 2 GeV u ⁻¹	10 ¹⁰ ppspill	FRS
NSCL/MSU	East Lansing, MI, USA	Two coupled superconducting cyclotrons	Up to 200 MeV u ⁻¹	⁴⁰ Ar 5 × 10 ¹¹ pps	A1900
RARF RIKEN	Tokyo, Japan	Ring cyclotron	Up to 100 MeV u ⁻¹	⁴⁰ Ar 5 × 10 ¹¹ pps	RIPS

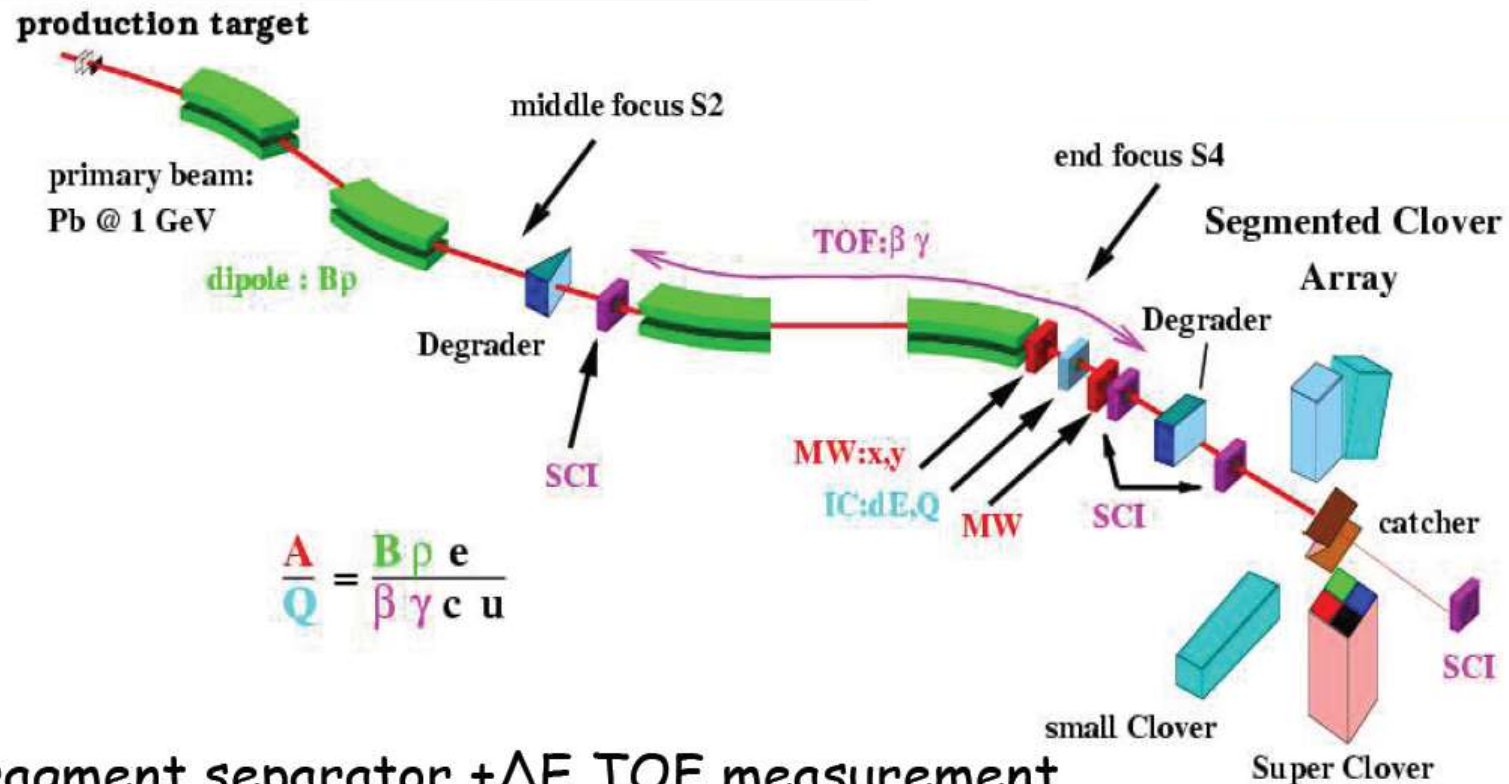
Y. Blumenfeld et al., Phys. Scripta T152, 014023 (2013)

Viacero nových experimentov v štádiu budovania alebo ugradu.

Produkcia jadier fragmentáciou

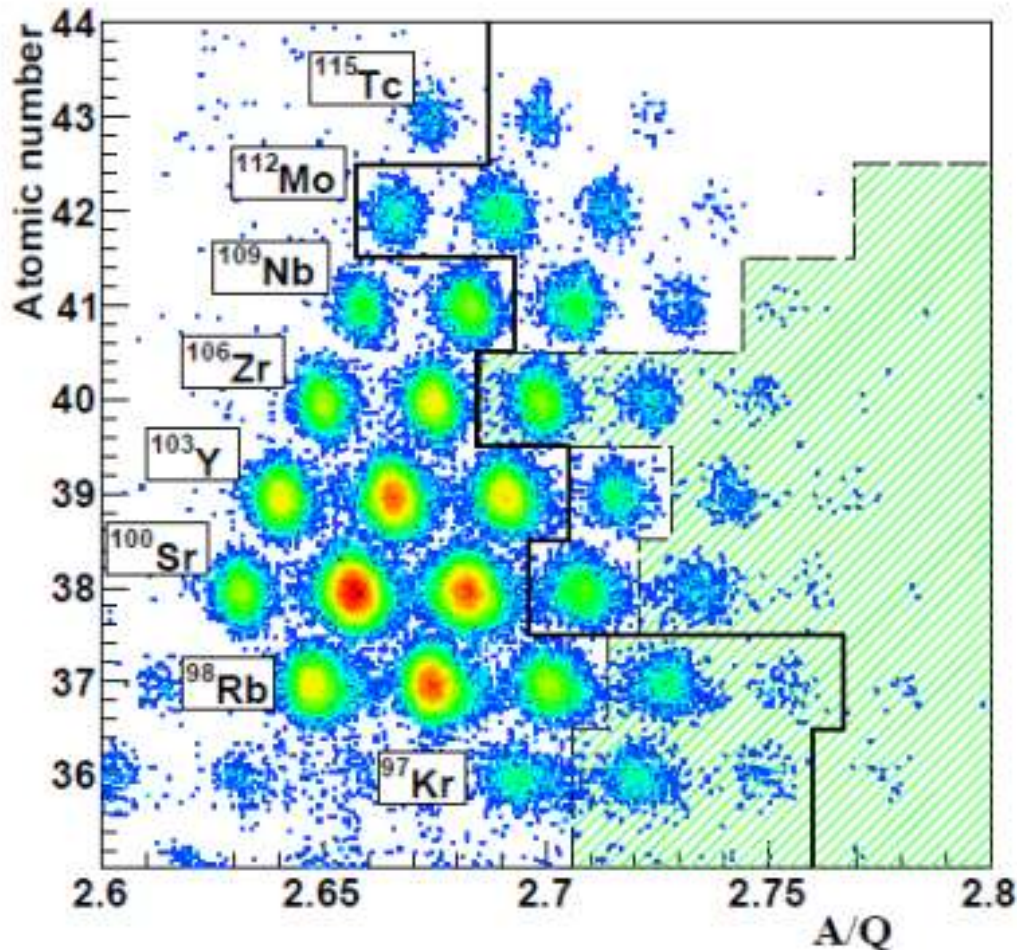


Energia 10 – 100 MeV/u - možnosť študovať izoméry s polčasom výrazne kratším – cca 100 ns.



Fragment separator + ΔE TOF measurement
full isotope identification !

Spôsob identifikácie



Identifikácia a získanie polčasov rozpadu pre veľmi neutrónovo bohaté jadrá. Vyšrafovaná časť reprezentuje čakacie body r-procesu.

Nishimura et al., Phys. Rev. Lett. 106, 025502 (2011)

Príklad merania: Produkcia jadra ^{22}C



Produkcia – relativistický zväzok ^{40}Ar (63 MeV/u) interaguje s produkčným terčom Ta (333 mg/cm²) a vytvára sa sekundárny zväzok $^{19,20,22}\text{C}$

Pozn. ^{21}C má dobu života menej ako 30 ns čo je vidno aj „prázdnu“ pozíciou v grafe. V prípade ^{22}C je to 6,2 ms, čo je dostatočne dlho na jeho separáciu.

Produkcia:

1.8×10^4 pre ^{19}C ,
 1.8×10^3 pre ^{20}C
10 pre ^{22}C

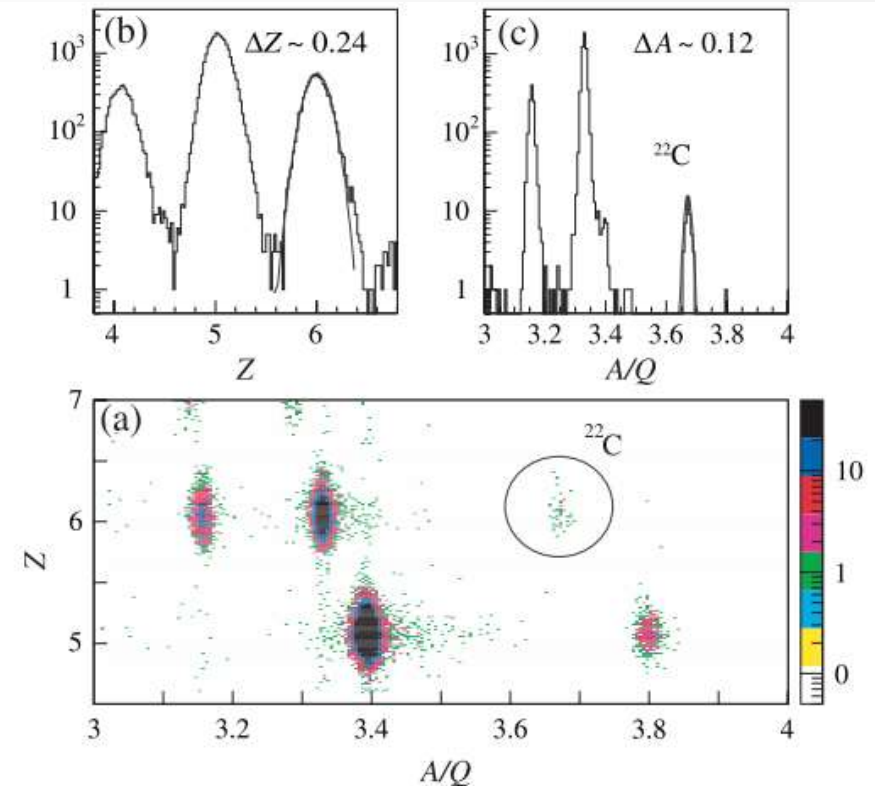


FIG. 1 (color). (a) Two-dimensional plot of Z versus A/Q in front of the reaction target. (b) Z projection of Fig. 1(a). The solid line indicates a Gaussian fit to the $Z = 6$ peak, yielding a $\Delta Z = 0.24$ in FWHM. (c) A/Q -projection spectrum for the $Z = 6$ particles. The solid line indicates a Gaussian fit to the ^{22}C peak, yielding a $\Delta A = 0.12$ in FWHM.



Observation of a Large Reaction Cross Section in the Drip-Line Nucleus ^{22}C

K. Tanaka,¹ T. Yamaguchi,² T. Suzuki,² T. Ohtsubo,³ M. Fukuda,⁴ D. Nishimura,⁴ M. Takechi,^{4,1} K. Ogata,⁵ A. Ozawa,⁶ T. Izumikawa,⁷ T. Aiba,³ N. Aoi,¹ H. Baba,¹ Y. Hashizume,⁶ K. Inafuku,⁸ N. Iwasa,⁸ K. Kobayashi,² M. Komuro,² Y. Kondo,⁹ T. Kubo,¹ M. Kurokawa,¹ T. Matsuyama,³ S. Michimasa,^{1,*} T. Motobayashi,¹ T. Nakabayashi,⁹ S. Nakajima,² T. Nakamura,⁹ H. Sakurai,¹ R. Shinoda,² M. Shinohara,⁹ H. Suzuki,^{10,6} E. Takeshita,^{1,†} S. Takeuchi,¹ Y. Togano,¹¹ K. Yamada,¹ T. Yasuno,⁶ and M. Yoshitake²

¹*RIKEN Nishina Center, Saitama 351-0198, Japan*

²*Department of Physics, Saitama University, Saitama 338-8570, Japan*

³*Department of Physics, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan*

⁴*Department of Physics, Osaka University, Osaka 560-0043, Japan*

⁵*Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan*

⁶*Institute of Physics, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan*

⁷*Radio-Isotope Center, Niigata University, Niigata 951-8510, Japan*

⁸*Department of Physics, Tohoku University, Miyagi 980-8578, Japan*

⁹*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8551, Japan*

¹⁰*Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

¹¹*Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan*

(Received 28 October 2009; published 8 February 2010)

Reaction cross sections (σ_R) for ^{19}C , ^{20}C and the drip-line nucleus ^{22}C on a liquid hydrogen target have been measured at around 40A MeV by a transmission method. A large enhancement of σ_R for ^{22}C compared to those for neighboring C isotopes was observed. Using a finite-range Glauber calculation under an optical-limit approximation the rms matter radius of ^{22}C was deduced to be 5.4 ± 0.9 fm. It does not follow the systematic behavior of radii in carbon isotopes with $N \leq 14$, suggesting a neutron halo. It was found by an analysis based on a few-body Glauber calculation that the two-valence neutrons in ^{22}C preferentially occupy the $1s_{1/2}$ orbital.

Polomer 22C



Polomer atómu by mala byť cca $1.2 \times A^{1/3}$

$$R \sim 1.2 \times 22^{1/3} \approx 3.36 \text{ fm}$$

Podľa nameraných účinných prierezov by mal byť polomer $5.4 \pm 0.9 \text{ fm}$.

Predstava je, že ide o „core“ + 2 slabo viazané neutróny. Odobretie jedného neutrónu však vedie k rozpadu jadra. (viď polčas ^{21}C)

Ide o tzv. Borromean jadrá.

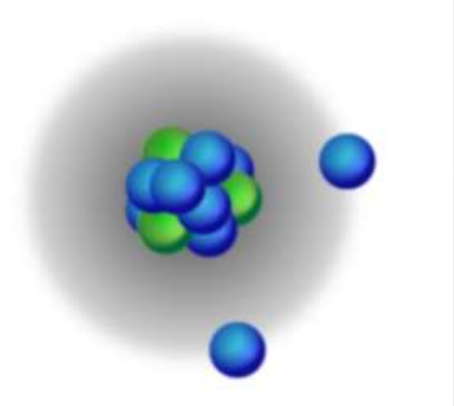


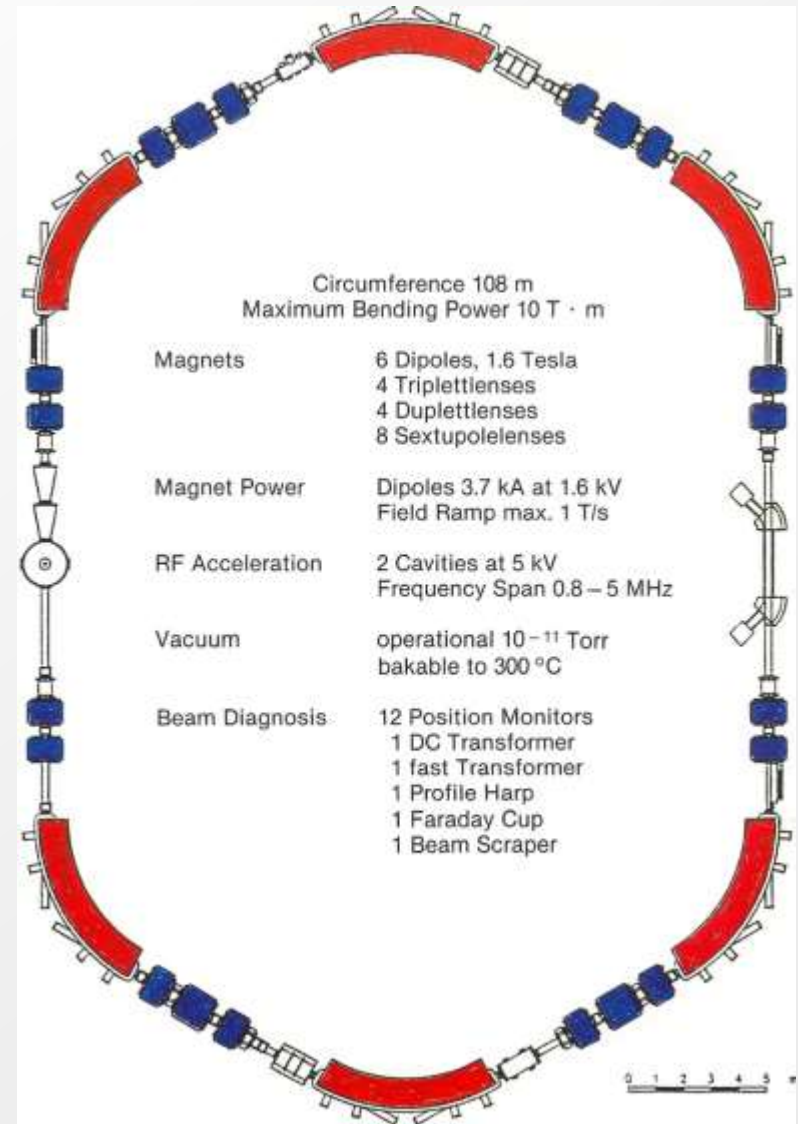
FIG. 1: ^{22}C is now the heaviest observed Borromean nucleus. Borromean nuclei are named after the rings from the 15th century crest of the Borromeo family from northern Italy. The rings are connected in such a way that the cutting of one ring results in the separation of all three. (Left) Marble representation of the Borromean rings, used as an emblem of Lorenzo de Medici in San Pancrazio, Florence [13]. (Right) Schematic view of ^{22}C showing the two halo neutrons around a core. Removing any one element makes the entire structure unstable. (Illustration: Alan Stonebraker)

Storage ring

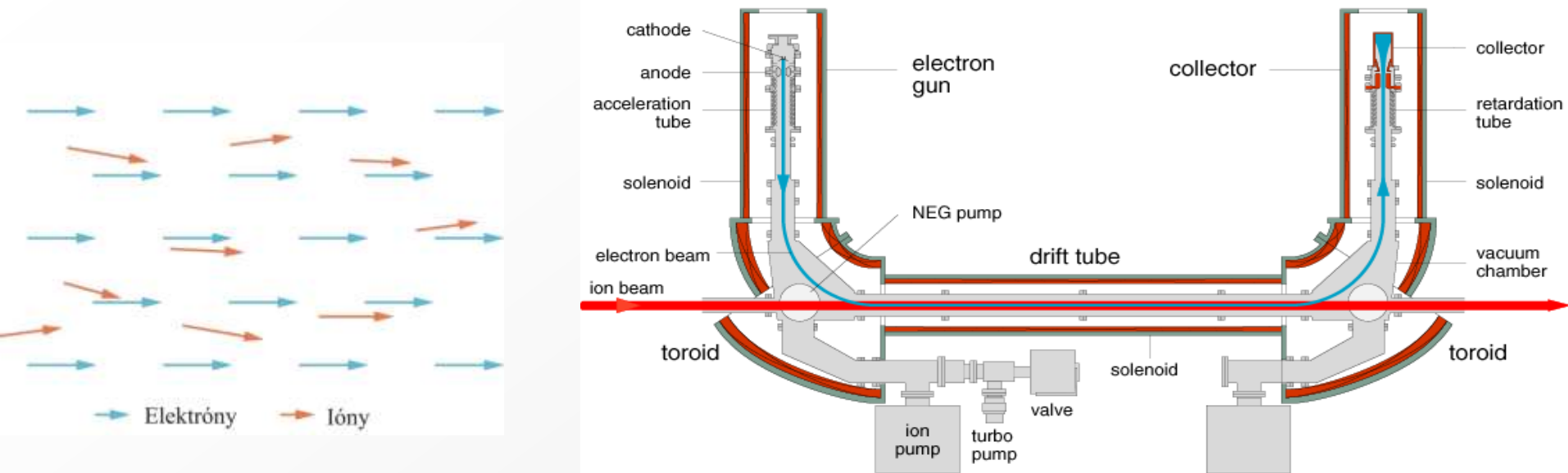


GSI Darmstadt
Experimental Storage Ring

Umožňuje spomalenie a
akumuláciu produkovaných iónov



Cooling of ion beam with electrons



Elektróny sa injektujú do dráhy iónov v driftovej trubici elektróny, rýchlosť ktorých je nastavená na optimálnu rýchlosť iónov. Driftová trubica sa nachádza v koaxiálnom magnetickom poli, ktoré veľmi efektívne zrovná smer pohybu elektrónov. Vplyv tohto mag. poľa na energetické ióny je výrazne menší.

Elektróny pomalšie ióny dobiehajú a pridajú im malý impulz v smere osi trubice. Rýchlejšie ióny sa narážajú na elektróny a sú pribrzdované v smere pohybu elektrónov.

Cooling of ion beam with electrons



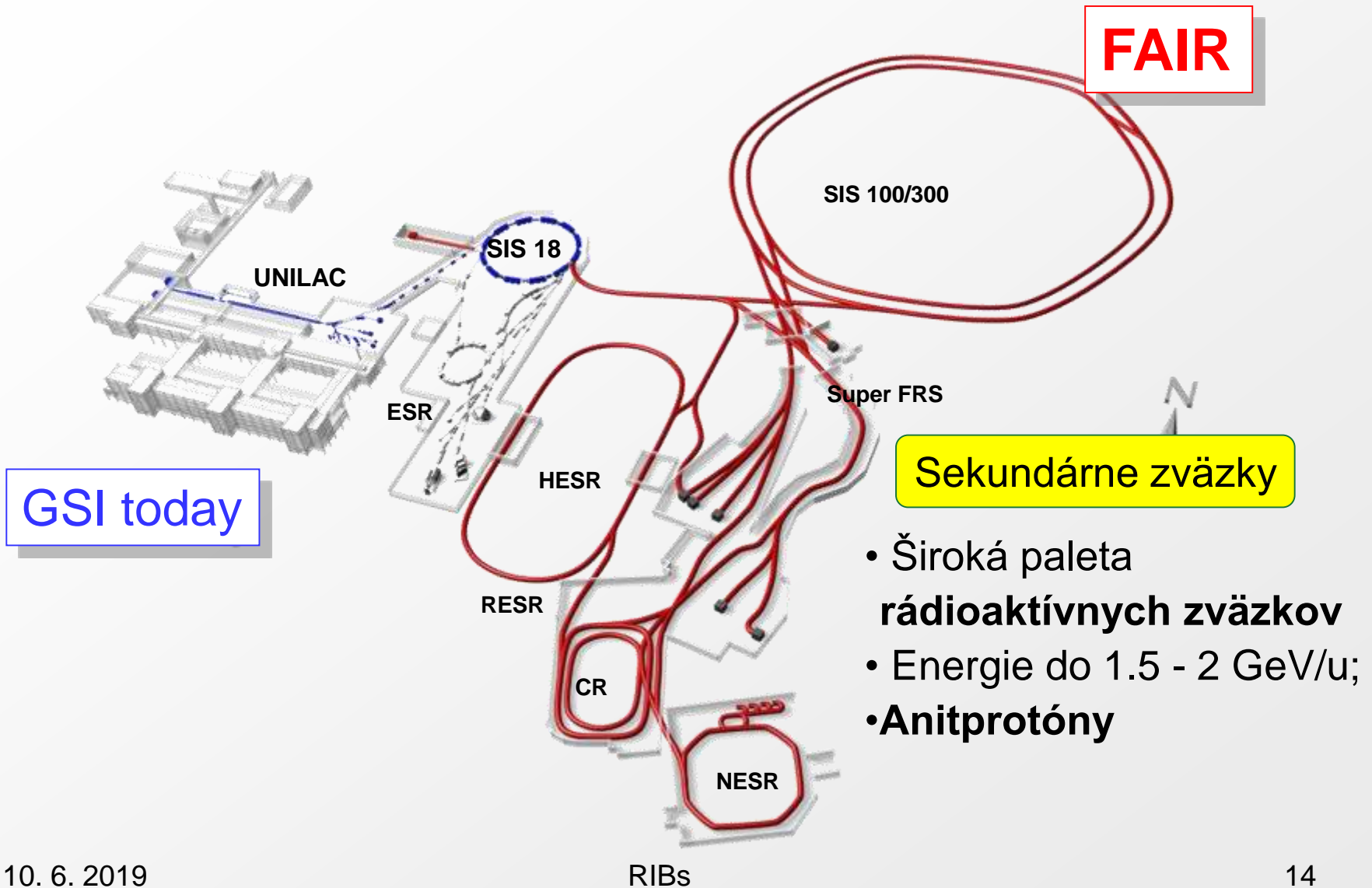
Základnou ideou stochastického chladenia zväzku je zisťovanie pohybu častice a jeho korekcia impulzným spôsobom (kicker). Následne sa korekcia aplikuje na celý „bunch“ iónov a nie na jednotlivé ióny



Stochastické chladenie elektrónmi je formou termodynamického chladenia, keď sa redukuje entropia systému.

Podstata je v nulovaní rôznej fázy iónov v prostredí.

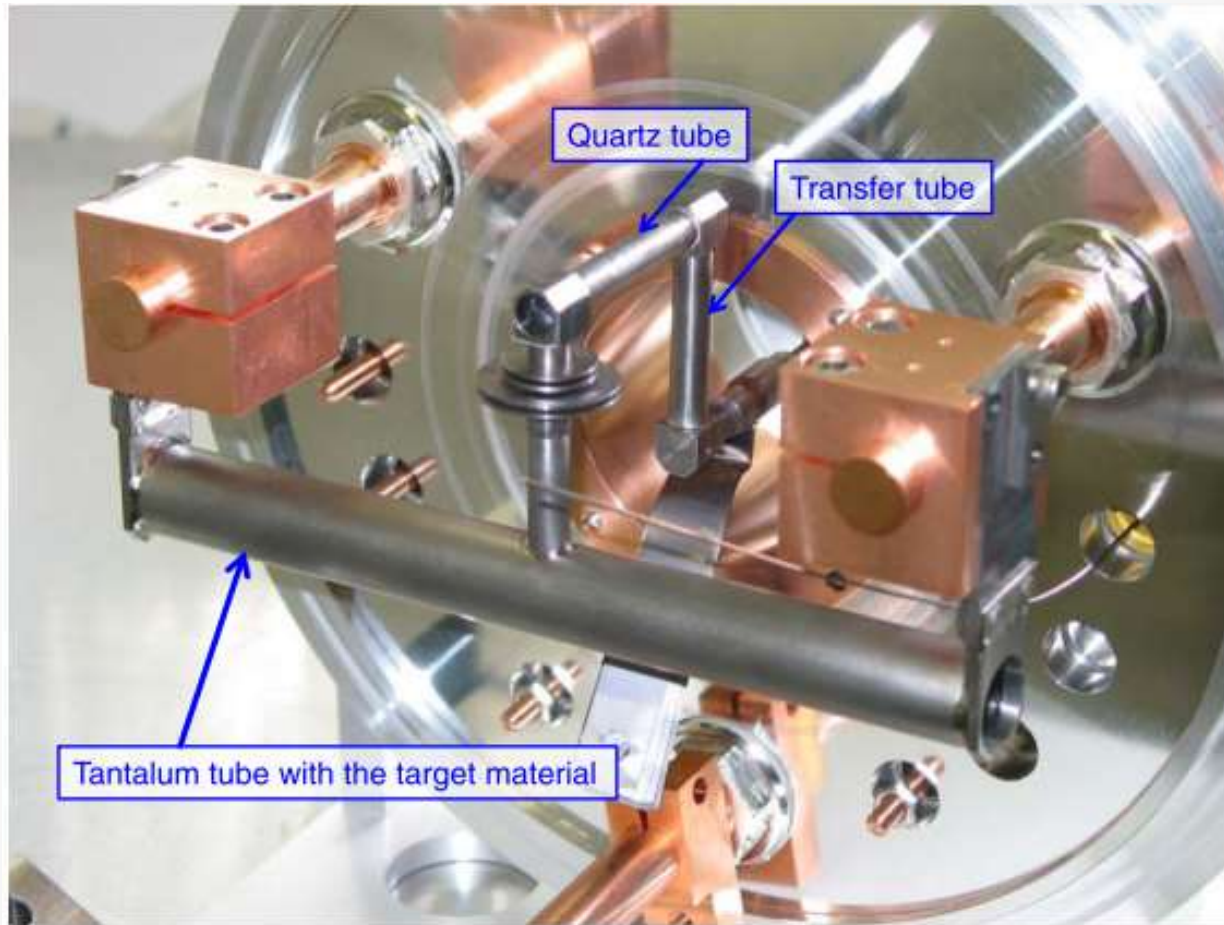
Projekt FAIR





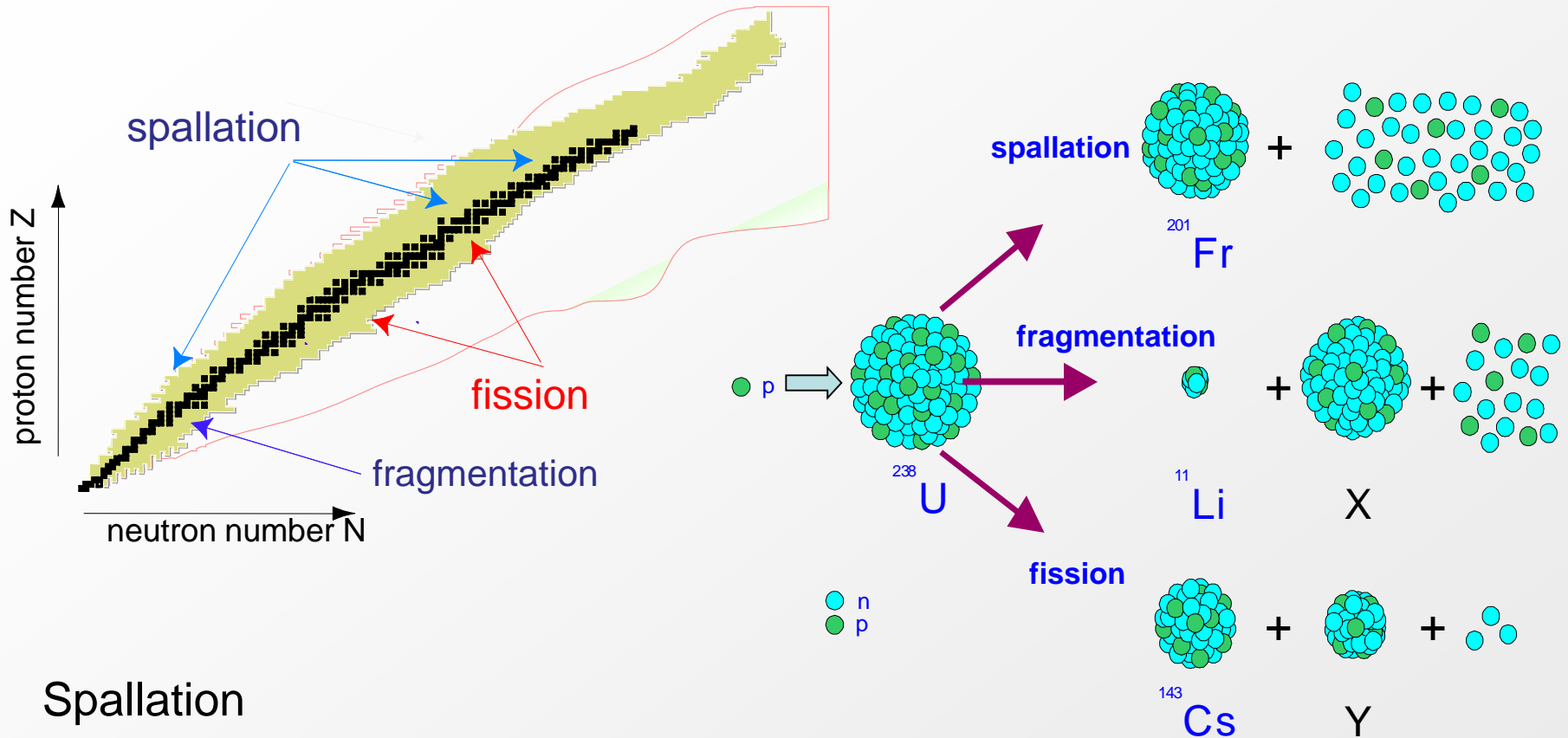
ISOL METÓDY TVORBY RÁDIOAKTÍVNYCH ZVÄZKOV

Terč



Y. Blumenfeld et al., Phys. Scripta T152, 014023 (2013)

RIB - Production reactions at ISOLDE



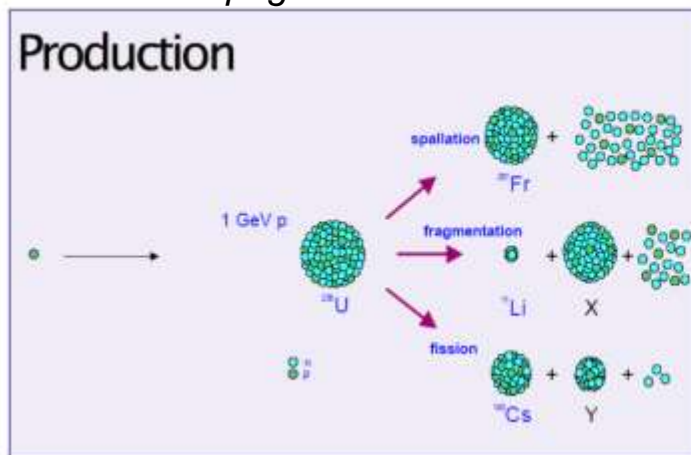
- Spallation
- Fragmentation
- Proton-induced Fission

Lighter targets are also used – the choice depends on specific nucleus we want to reach

Produkcia jadier ISOL technickou



Zdroj: ISOLDE web page



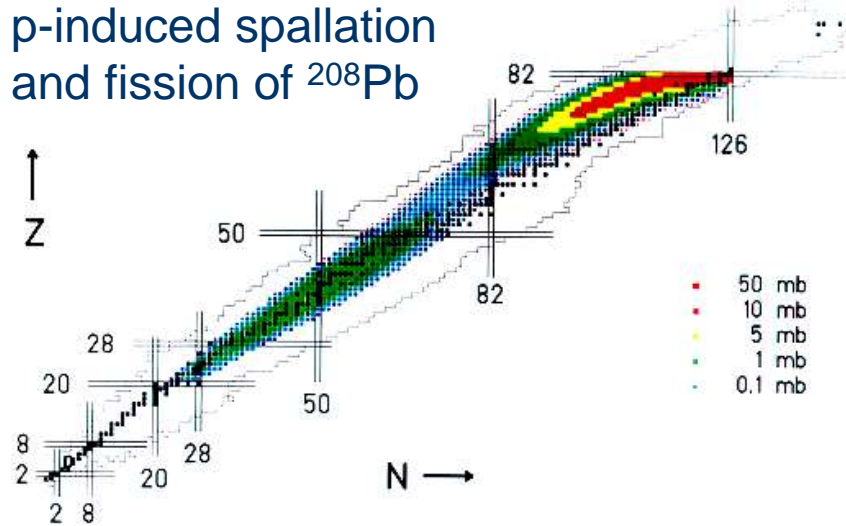
GPS $M/\Delta M = 2400 - 15000$ HRS $M/\Delta M = 30000$ (teoreticky)

Výhoda: Rozlíšenie hmotností na úrovni 5 MeV Nevýhoda: čas extrakcie na úrovni 100 ms

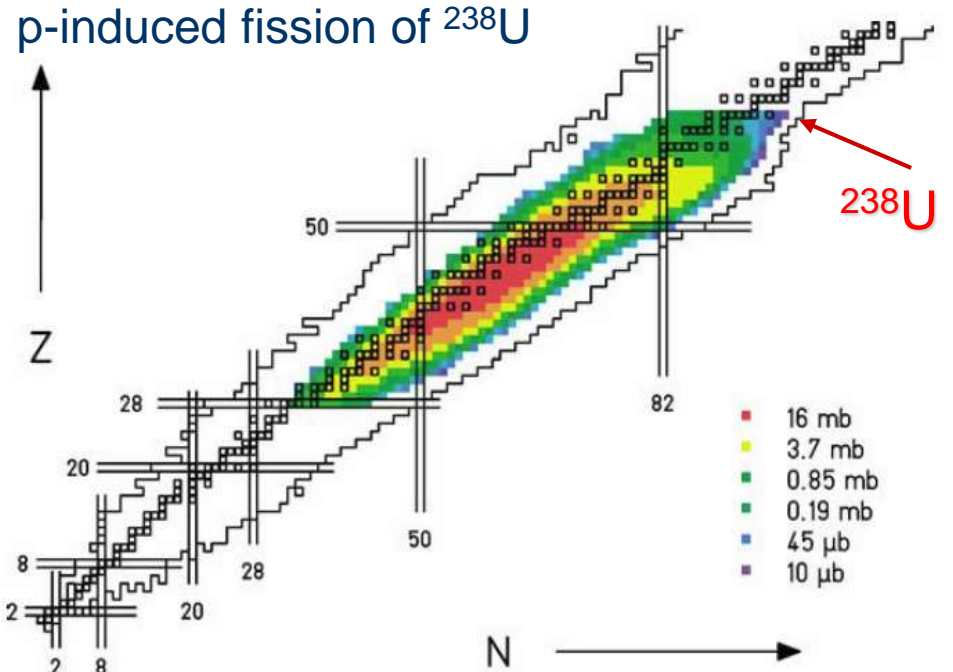


Production mechanisms: Fragmentation and Fission

p-induced spallation and fission of ^{208}Pb



p-induced fission of ^{238}U



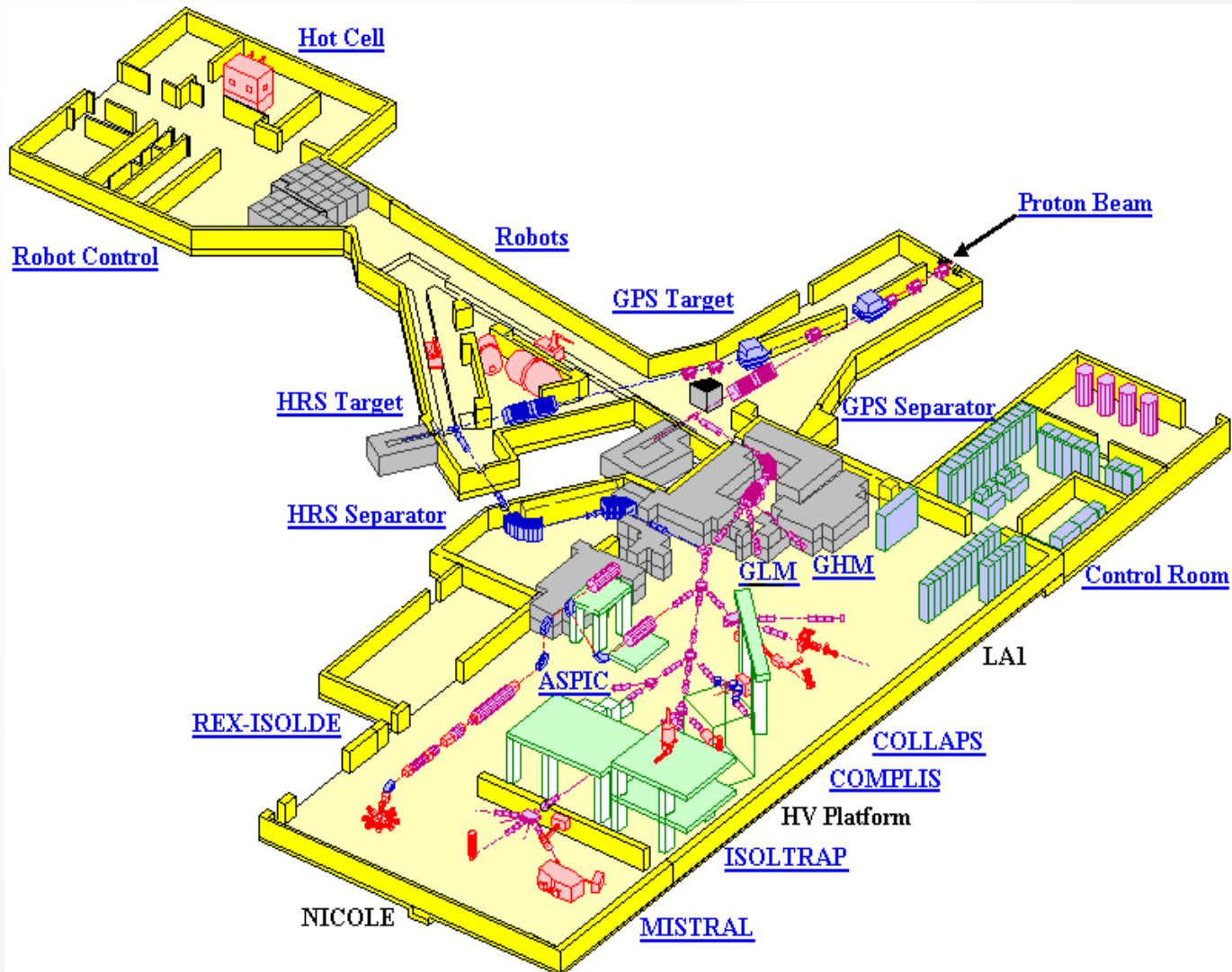
Large number of different isotopes is simultaneously produced! Need some method to select a required nucleus!

Use mass separator to select mass A - ISOLDE

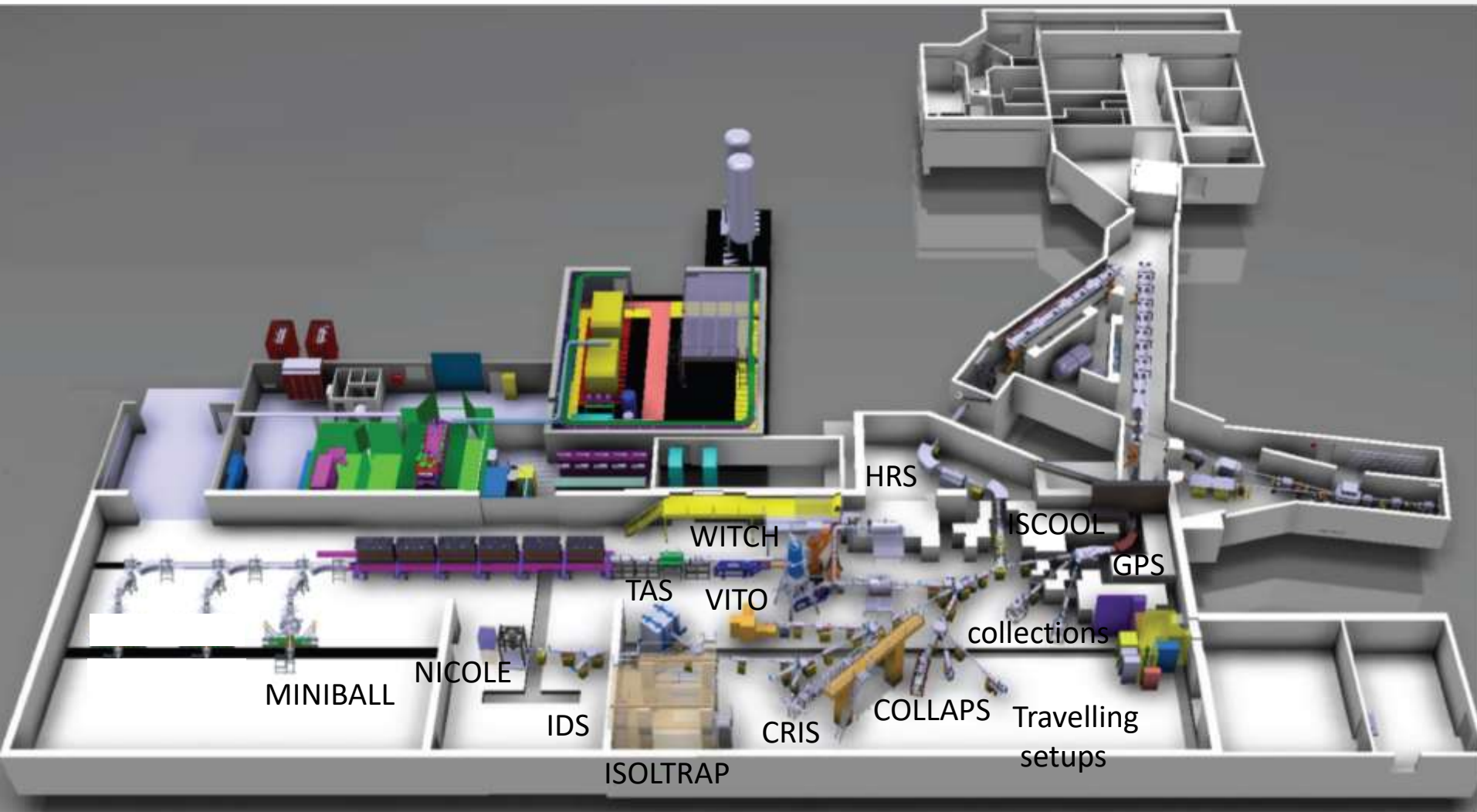
Use laser Ion Source to select Z - RILIS

Thus the combination of RILIS&ISOLDE provide a unique A and Z identification (sometimes, isomer separation!)

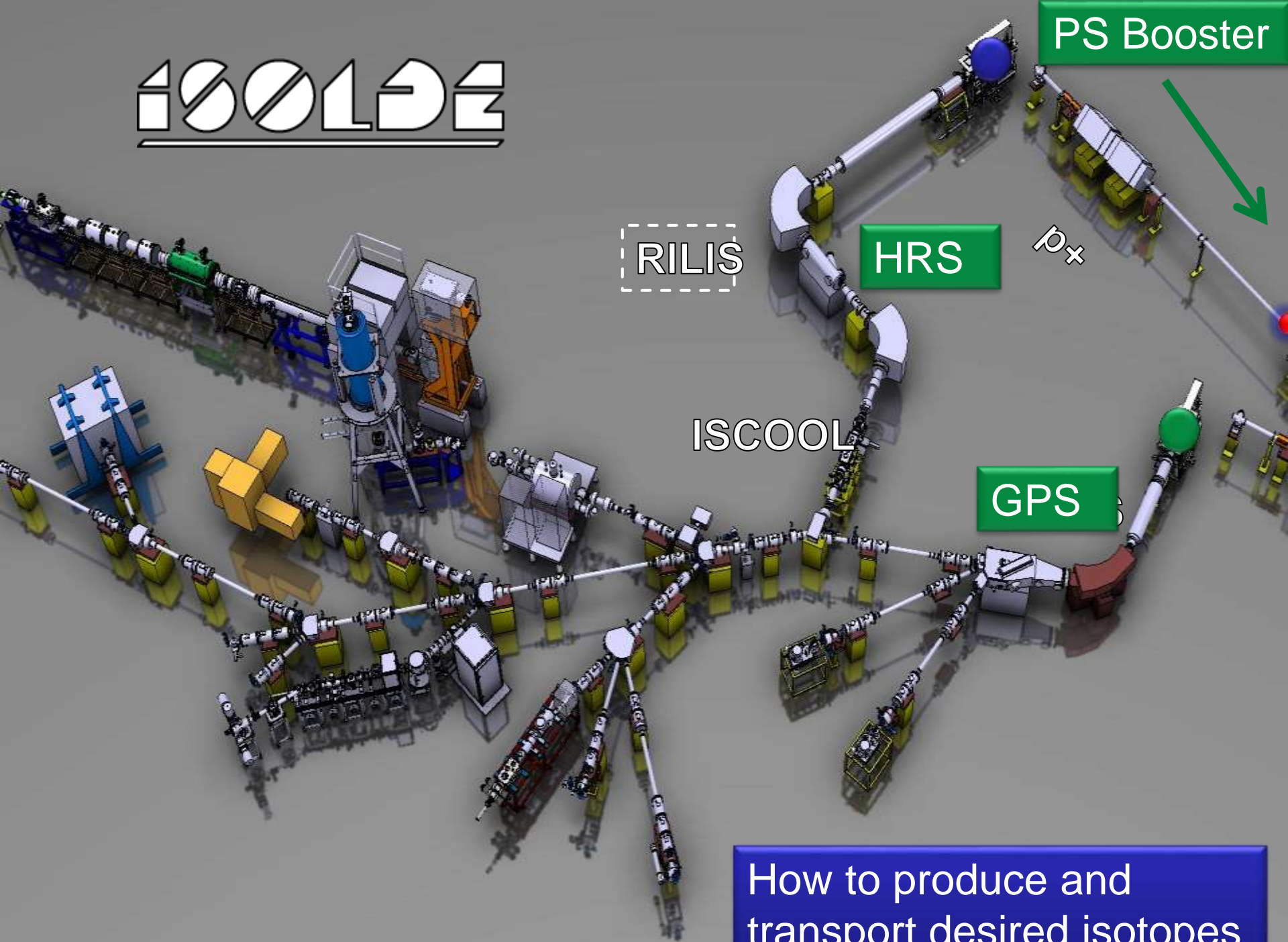
ISOLDE – pure RIB



ISOLDE – pure RIB



ISOLDE



RILIS

HRS

PS Booster

p+

ISCOOL

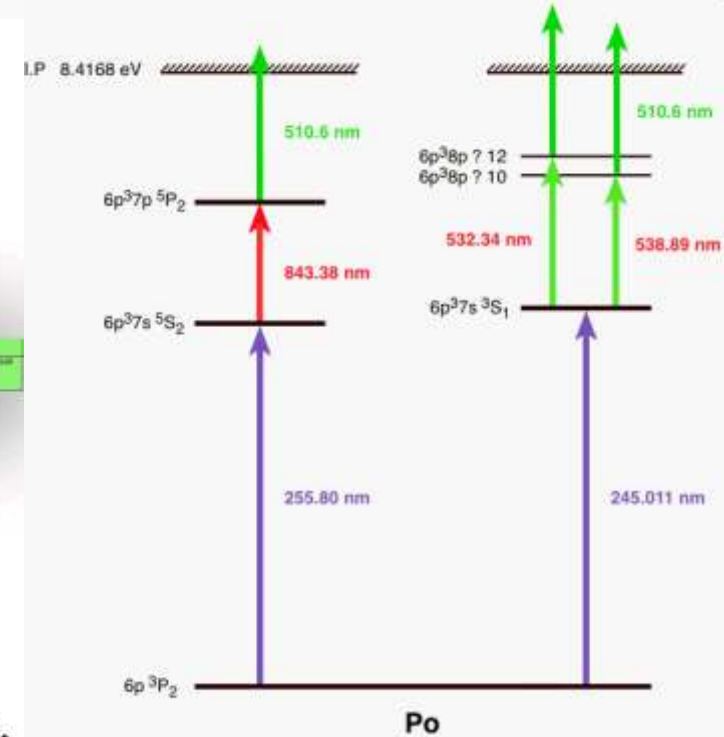
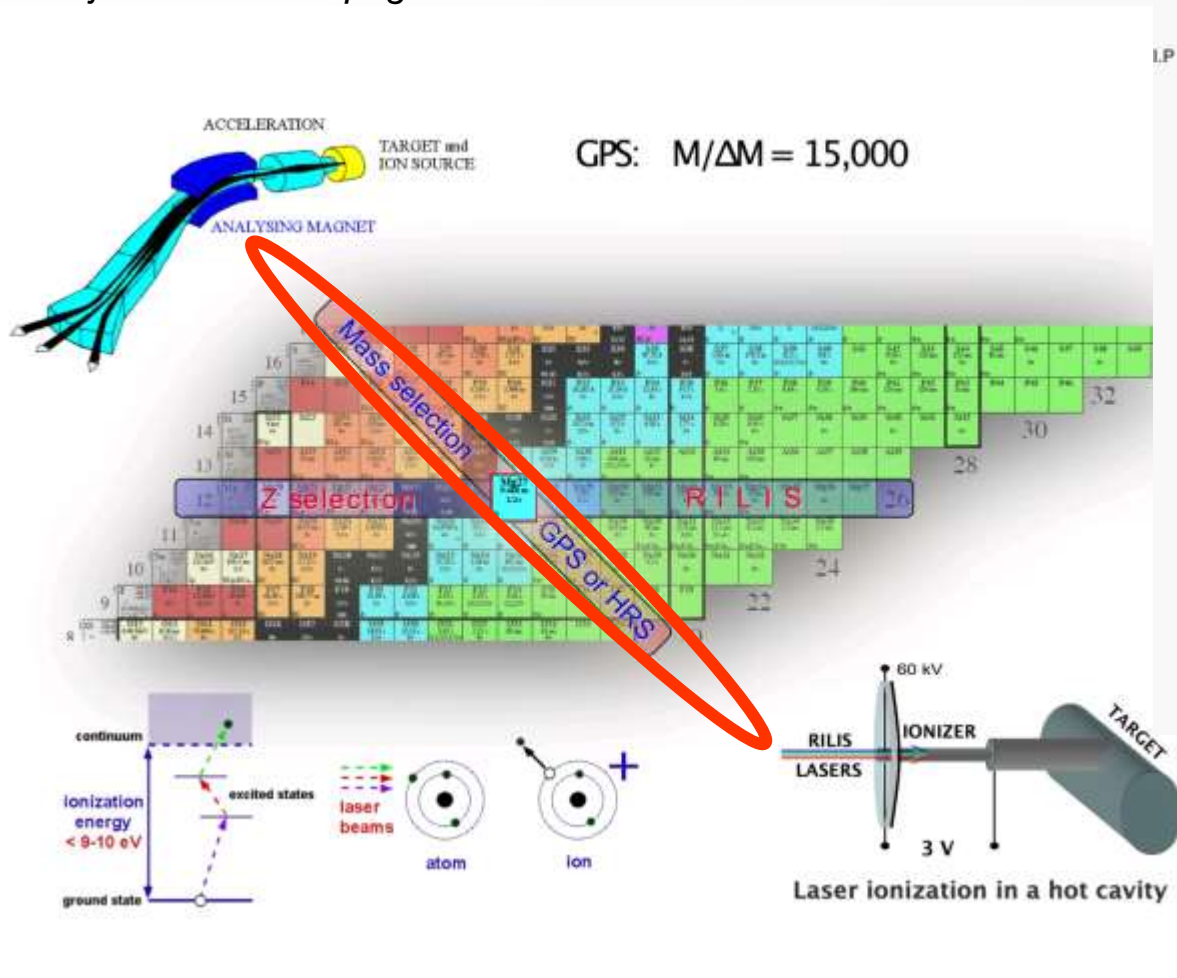
GPS

How to produce and transport desired isotopes

Využitie laseru

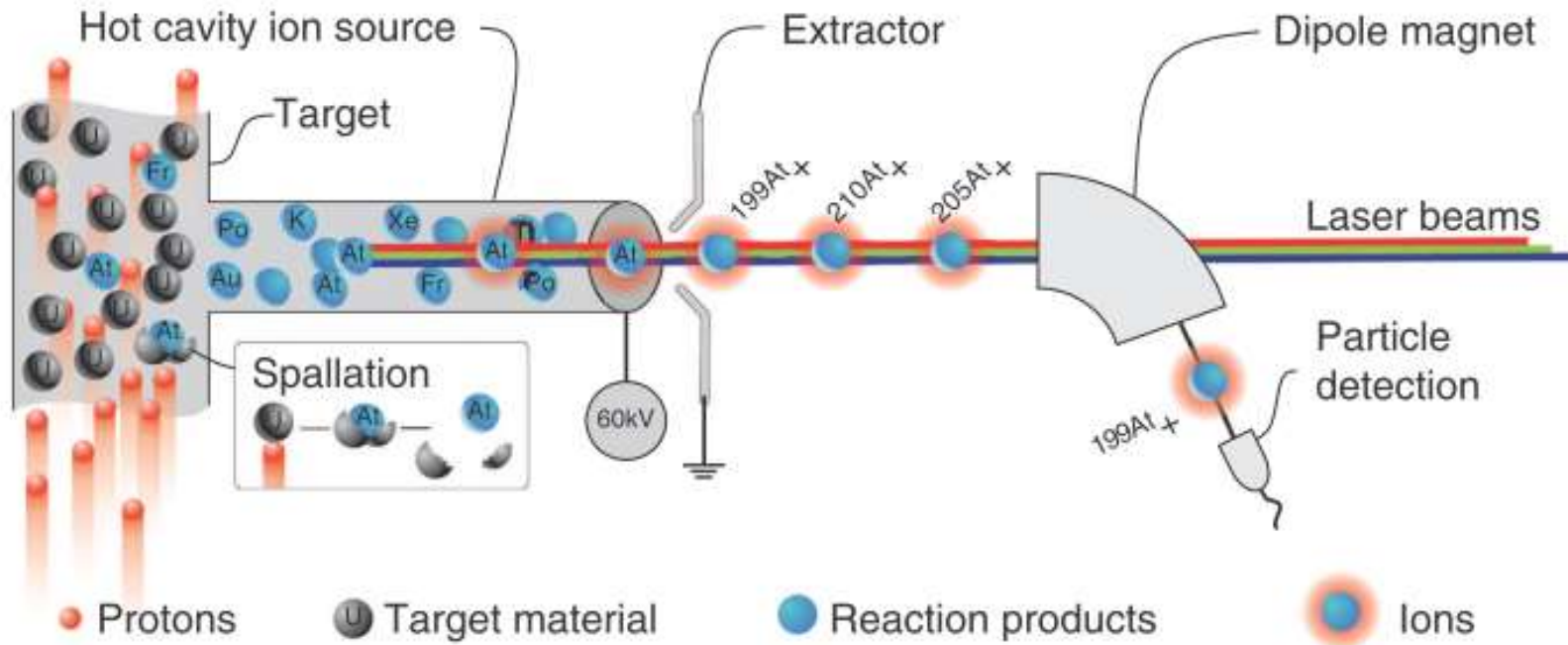


Zdroj: ISOLDE web page



Excitácia atómu pomocou laseru.

Spôsob využitia



S. Rothe et al. Nature Communications 4, 1835 (2013)

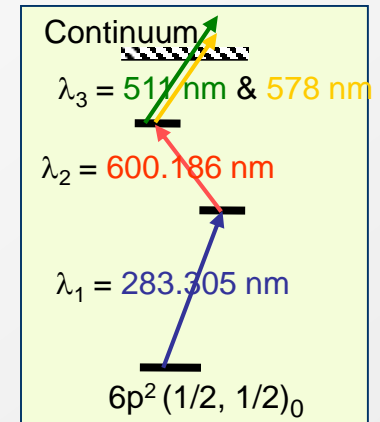
Spektroskopia s využitím laseru



Celkový uhlový moment hybnosti atómu je

$$\mathbf{F}_{\text{atom}} = \mathbf{I}_{\text{nuclear}} + \mathbf{J}_{\text{electron}}$$

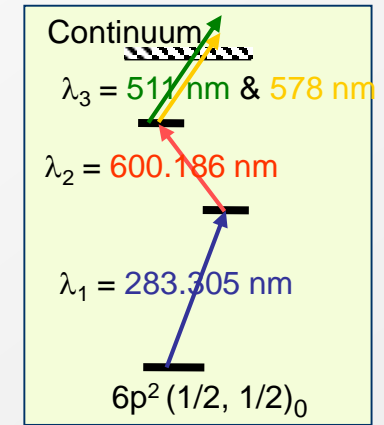
Takže ak poznáme rozloženie elektrónových orbitalov, dokážeme ionizovať atómy postupnou excitáciou elektrónu.



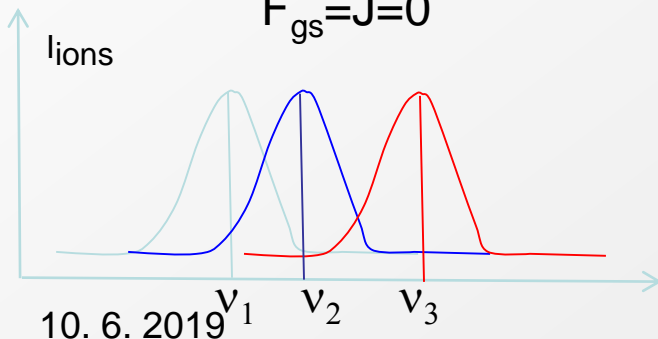
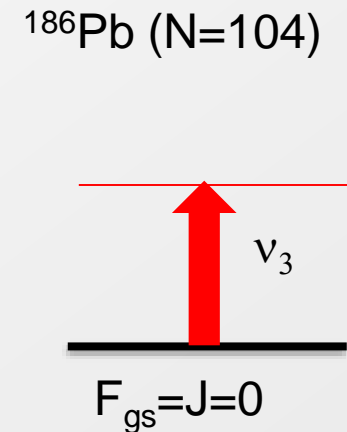
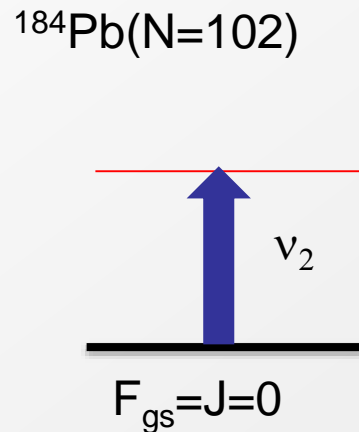
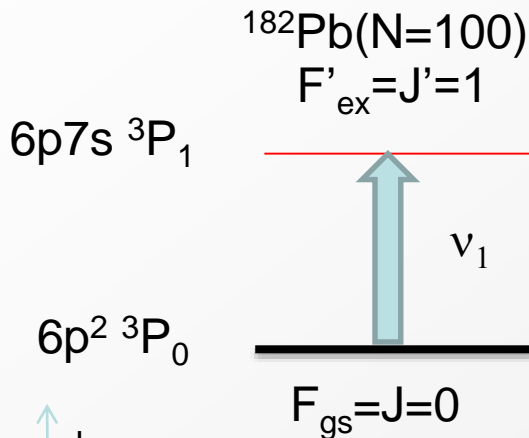
párno-párne jadrá



Pre párno-párne jadrá máme $I=0$ a preto $F=J$
 V prípade práno-párnych jadier máme iba jedno rezonančné maximum zodpovedajúce vybranému prechodu.



Príklad párno-párne izotopy olova ($Z=82$)



• $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$ Isotope Shift (IS)
 IS proportional to the charge radius!

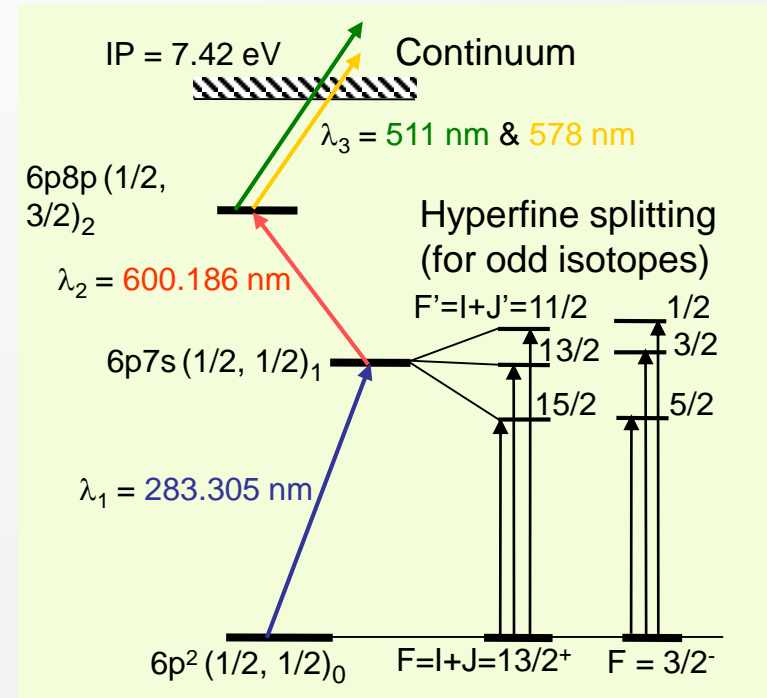
nepárno-párne jadrá



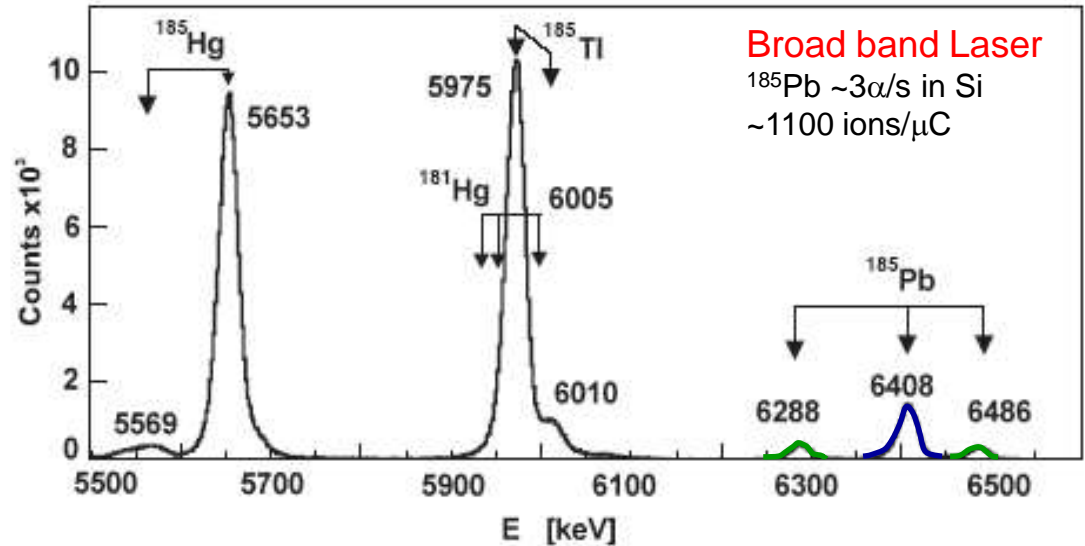
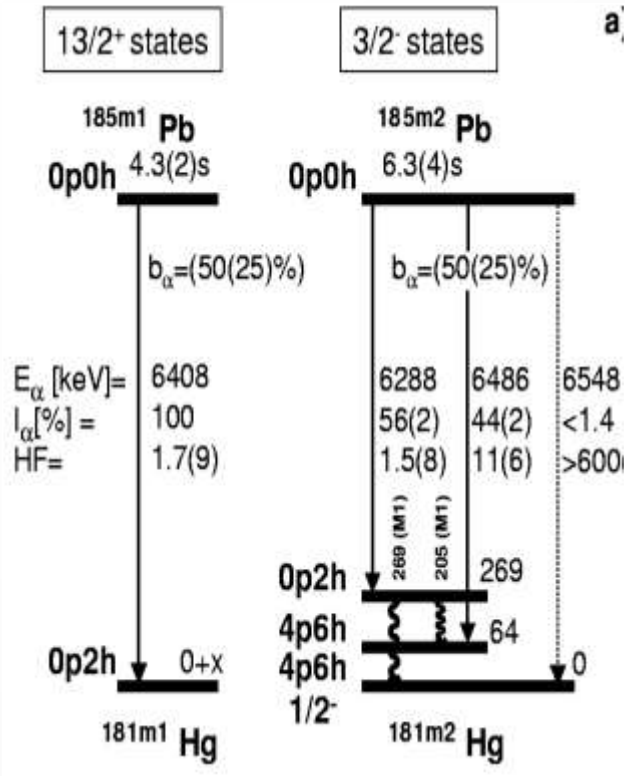
V dôsledku nenulového spinu jadra prichádza k hyperjemnému štiepeniu elektrónových hladín.

Následne ak nastavíme dostatočne úzko šírku frekvencií laseru, môžeme skenovať jednotlivé rozštiepené hladiny.

V prípade existencie izomérneho stavu jadra, je štiepenie hladín v atómovom odlišné odlišné pre základný stav jadra a vzбудený stav jadra.



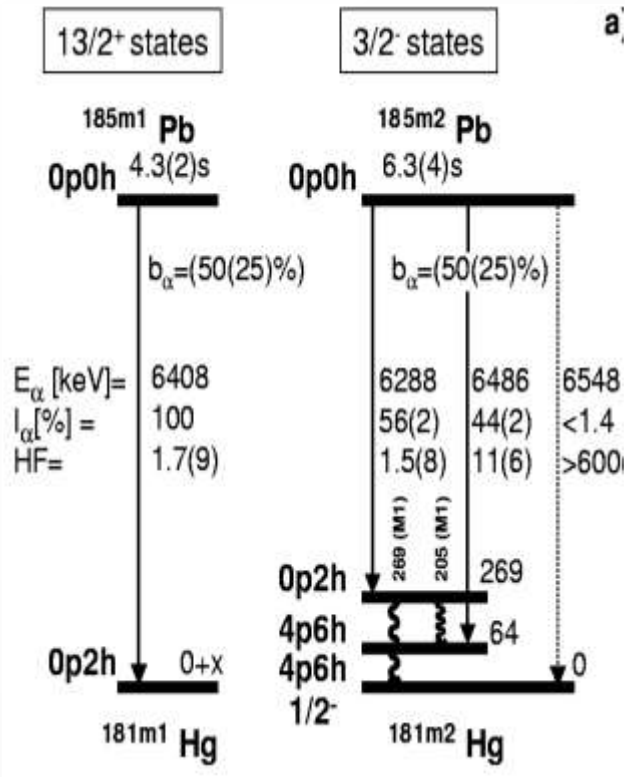
separácia izomérov jadrá



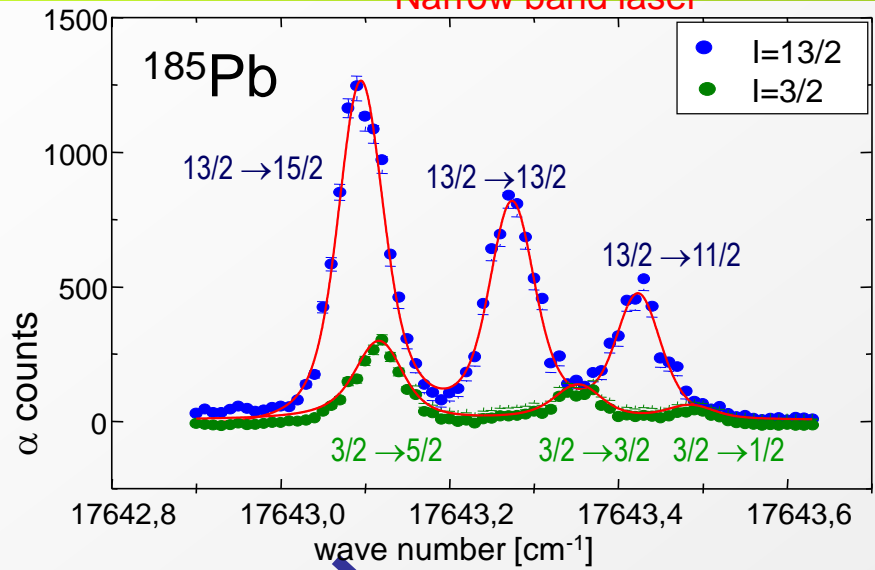
separácia izomérov jadrá



Narrow band laser



a



$F=I+J$

$I=13/2^+$

13/2 → 15/2

13/2 → 13/2

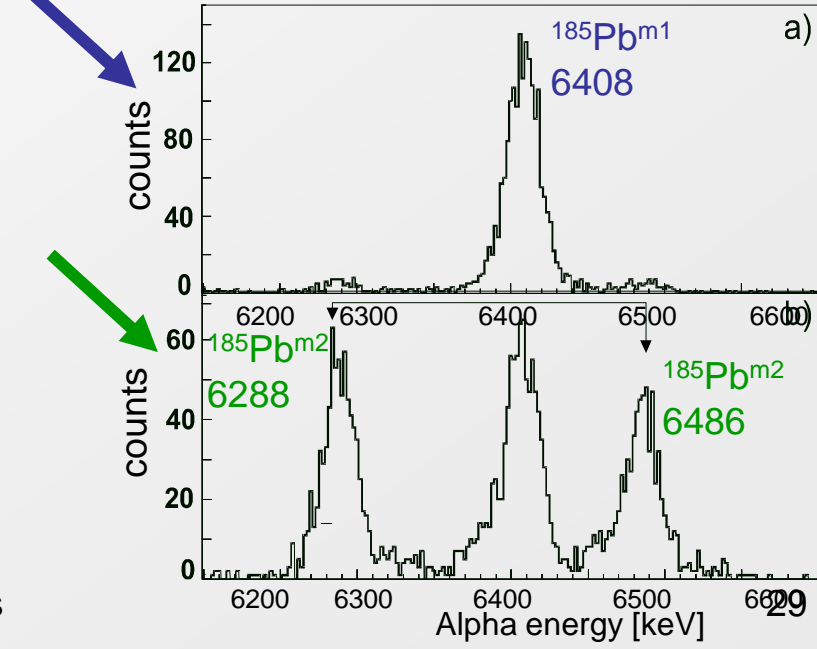
13/2 → 11/2

$I=3/2^-$

3/2 → 5/2

3/2 → 3/2

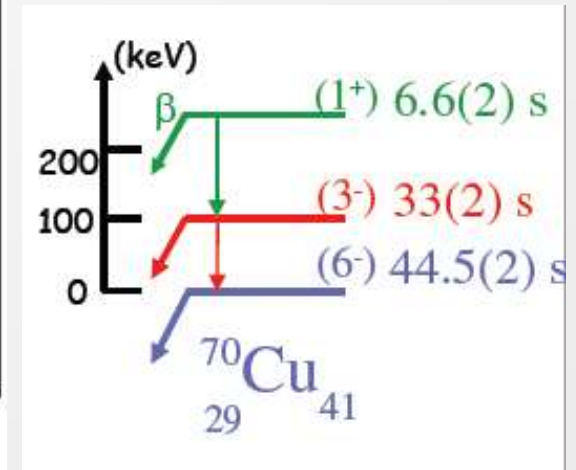
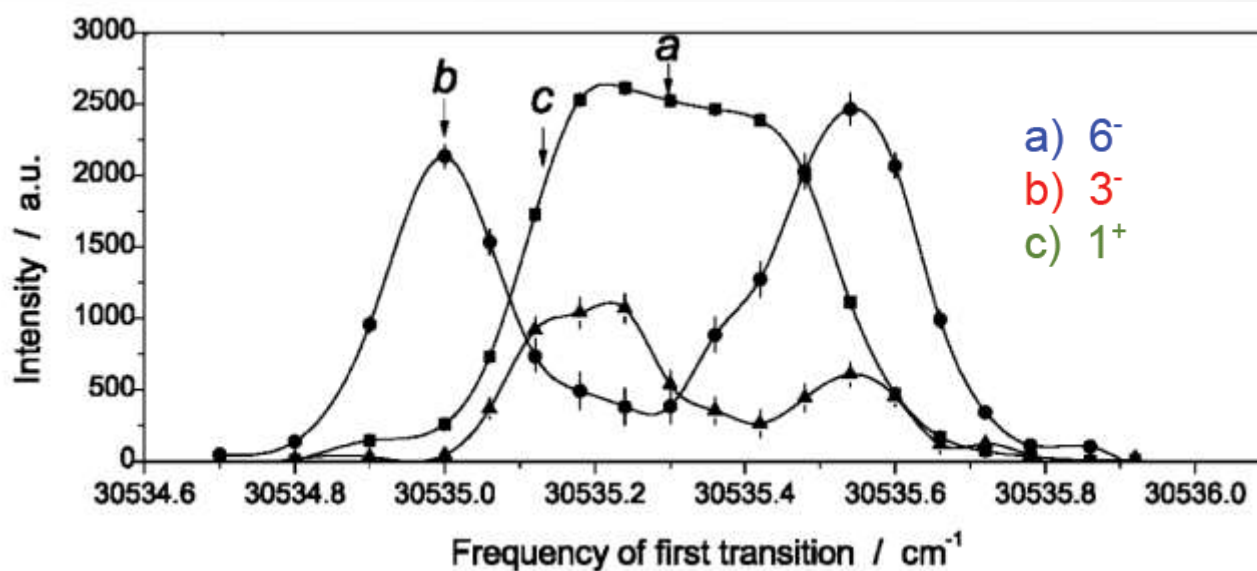
3/2 → 1/2



Selekcia izomérených stavov



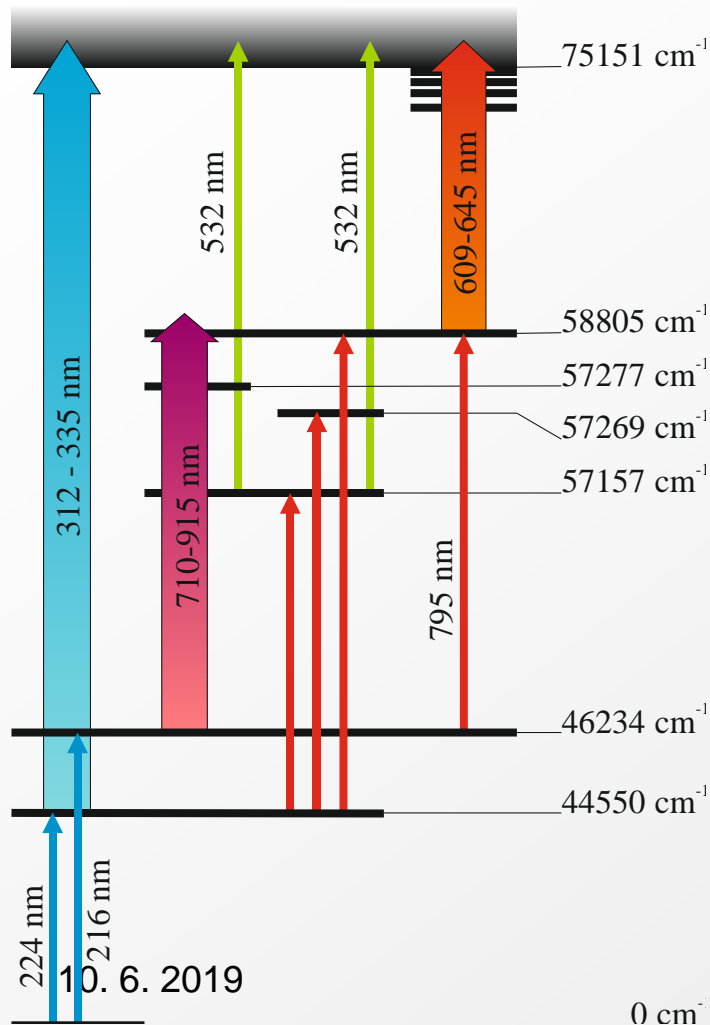
Ako sme spomenuli – izoméne stavy majú rozdielnu konfiguráciu atómového obalu a teda v princípe je možné rozlíšiť



Príklad realizácie



Pre mnohé prvky nemáme k dispozícii ionizačné schémy (rozloženie elektrónových hladín) a ionizačné potenciály



nature COMMUNICATIONS

ARTICLE

Received 21 Aug 2012 | Accepted 27 Mar 2013 | Published 14 May 2013

DOI: 10.1038/ncomms2819 OPEN

Measurement of the first ionization potential of astatine by laser ionization spectroscopy

S. Rothe^{1,2}, A.N. Andreyev^{3,4,5,6}, S. Antalic⁷, A. Borschevsky^{8,9}, L. Capponi^{4,5}, T.E. Cocolios¹, H. De Witte¹⁰, E. Eliav¹¹, D.V. Fedorov¹², V.N. Fedosseev¹, D.A. Fink^{1,13}, S. Fritzsche^{14,15,†}, L. Ghys^{10,16}, M. Huyse¹⁰, N. Imai^{1,17}, U. Kaldor¹¹, Yuri Kudryavtsev¹⁰, U. Köster¹⁸, J.F.W. Lane^{4,5}, J. Lassen¹⁹, V. Liberati^{4,5}, K.M. Lynch^{1,20}, B.A. Marsh¹, K. Nishio⁶, D. Pauwels¹⁶, V. Pershina¹⁴, L. Popescu¹⁶, T.J. Procter²⁰, D. Radulov¹⁰, S. Raeder^{2,19}, M.M. Rajabali¹⁰, E. Rapisarda¹⁰, R.E. Rossel², K. Sandhu^{4,5}, M.D. Seliverstov^{1,4,5,12,10}, A.M. Sjödin¹, P. Van den Bergh¹⁰, P. Van Duppen¹⁰, M. Venhart²¹, Y. Wakabayashi⁶ & K.D.A. Wendt²

Experimenty vo svete



Hlavné experimenty s urýchlenými RA zväzkami.

Facility	Location	Driver	Post-accelerator	Final energy	Main beams available
REX-ISOLDE	CERN, Geneva	PS Booster, 1.4 GeV protons	REX LINAC	0.3A–3A MeV	Large variety including fission fragments
SPIRAL	Caen, France	GANIL coupled cyclotrons	CIME cyclotron	2.7A–25A	He, Ne, Ar, Kr, N, O, F
TRIUMF/ISAC	Vancouver, Canada	500 MeV proton cyclotron	ISAC I and II RFQ + SC LINAC	0.2–11A MeV	Large variety including fission fragments

Y. Blumenfeld et al., Phys. Scripta T152, 014023 (2013)

Pripravované projekty

SPES v INFN Legnaro (Taliansko)

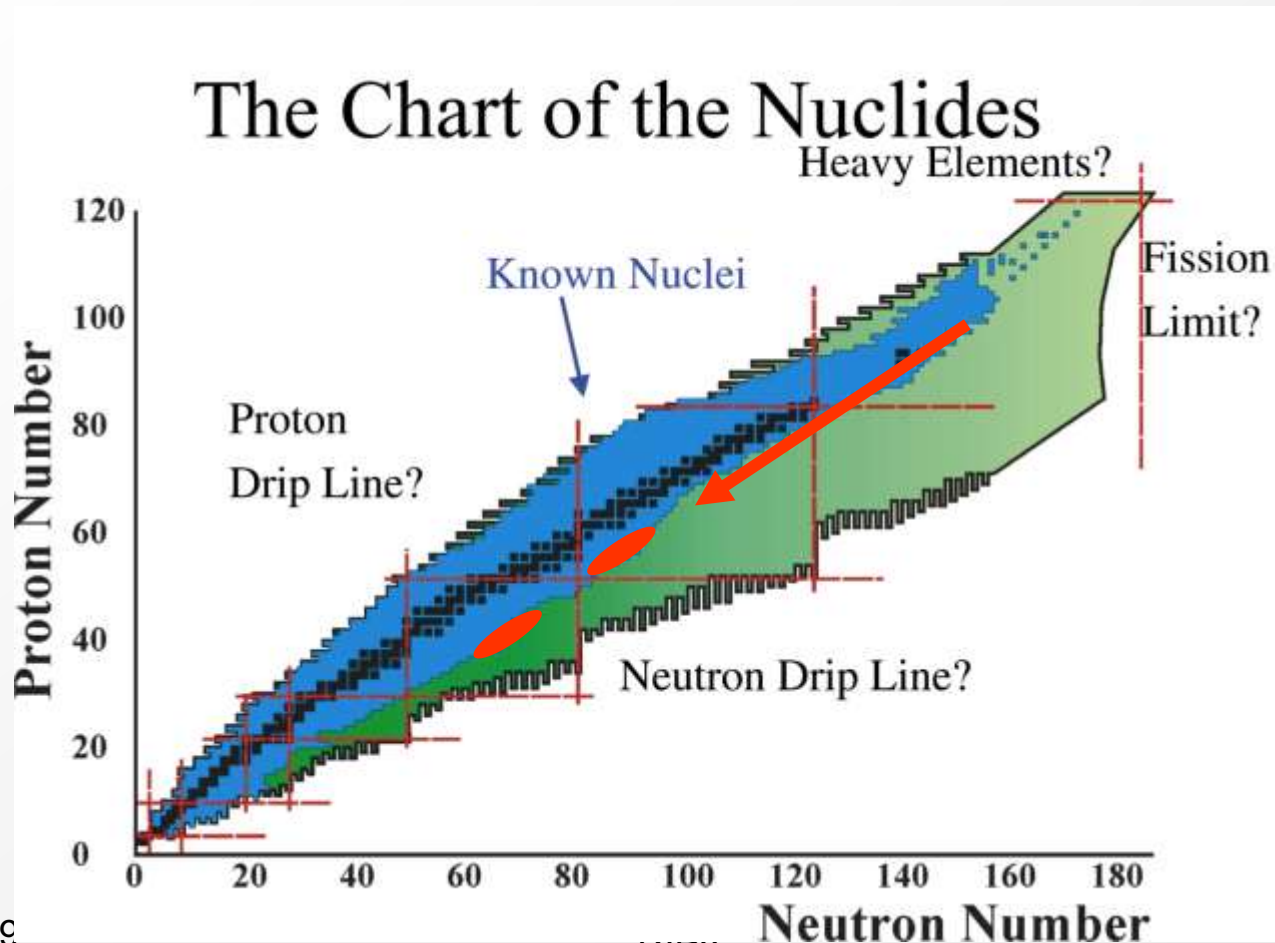
SPIRAL2 v GANIL (Caen, Francúzsko)

ISOL@MYRRHA (Belgicko - subkritický reaktor stimulovaný 600 MeV
protónovým urýchľovačom)

Výhody pre malé zariadenia



Technológia je využiteľná aj pre malé zariadenia. Princípom ostáva fragmentácia ťažkých jadier (zvyčajne urán), nie je však potrebná vysoká energia zväzku (za cenu menšieho výťažku RA izotopov)



Príklady ďalších experimentov

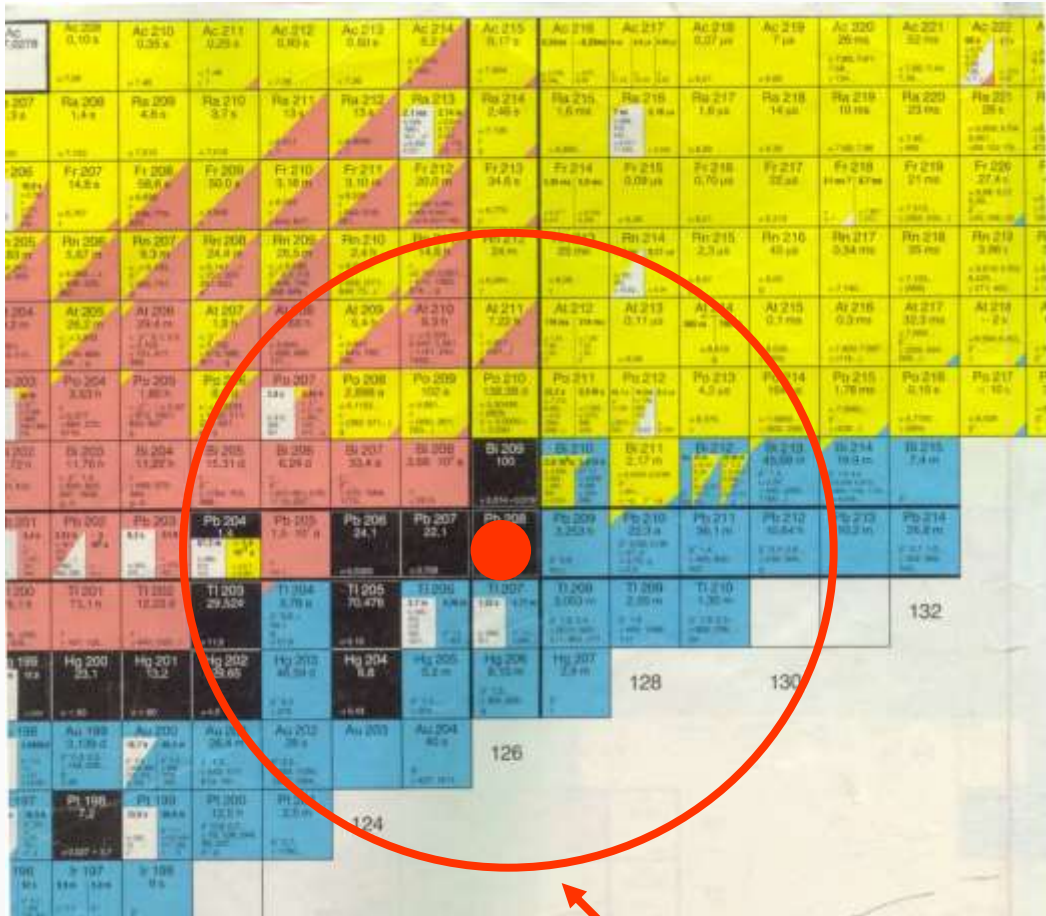


- Napr. IGISOL v Jyväskylä kde 50 MeV protónový zväzok interaguje s ^{238}U (príp. ^{232}Th). Extrahované fragmenty sa zberajúv héliu (200 – 500mb) a transportujú na jednotlivé experimenty merajúce vlastnosti týchto jadier (napr. laser. spect. alebo hmotnostné pasce).
- Podobné projekty CARIBU v ANL (využívajúci ^{252}Cf), ALTO v IPN Orsay (50 MeV e^- urýchľovač), EXCYT v LNS Catania atď.



REAKCIE PRENOSU A RIBS

Produkcia jadier transfer reakciou



Relevantná oblasť pri použití terča ^{208}Pb

- Prenos nukleónov medzi terčovým jadrom a projektilom.
- Prenáša sa jeden alebo viac protónov, neutrónov príp. aj jadro uhlíka

(d,p) reakcia



Aké informácie môžeme získať?

Excitačné energie obsadzovaných stavov

Uhlovú distribúciu produktov reakcie

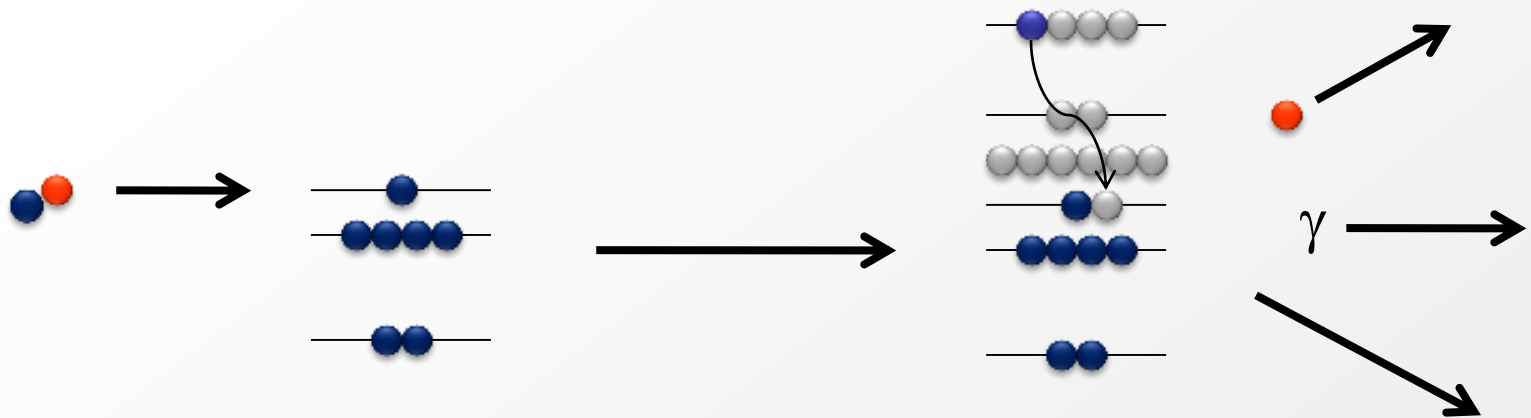
Relatívne pravdepodobnosti obsadzovania stavov

(\Rightarrow spektroskopický faktor)

Gamma kvantá emitované pri de-excitácii

...

(d,p) reakcie

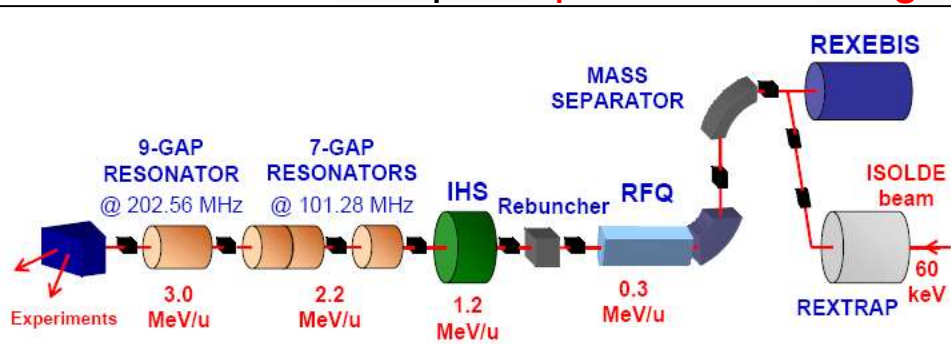


- Silný nástroj v kombinácii s in-beam spektroskopiou. Nukleón môže obsadzovať hladinu ležiacu niekoľko MeV nad základným stavom. Z emitovaných gama kvánt máme nezávislú informáciu o populovaných hladinách.
- Protón môže okrem informácie o energii a uhlovej distribúcii reakcie poskytnúť aj možnosť rozlíšenia žiadúcich reakcií od pozadia.

REX-ISOLDE and HI-ISOLDE at CERN



- **ISOLDE-CERN** (in operation since 1967):
 - beams of ~ 600 radioactive isotopes available at 60 keV
- **Radioactive ion beam Experiment (REX) at ISOLDE** (from 2002 on):
 - an efficient concept for **post-accelerating radioactive isotopes** up to 3 MeV/u,



- **High-Energy at ISOLDE (HIE-ISOLDE)**, >2010 - further post-acceleration up to $\sim 5-10$ MeV/u (above the Coulomb barrier)



In-beam of RIB



- **Instrumentation** (e.g. MINIBALL, CD, position-sensitive Si barrel ...)

- Coulex reactions (e.g. Hg, Rn)
- Transfer reactions
- Fusion reactions
- Stellar reaction rates
- Reactions with isomeric beams
- Recoil spectrometer

