

Jadrová spektroskopía

Rádioaktívne zväzky



Stabilné zväzky vs. RIB



- Zväzkov s využitím elementárnych častíc je veľmi málo. V podstate iba protóny, mióny, elektróny, neutróny, fotóny... Snahy o intenzívne neutrínové zväzky.
- 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.

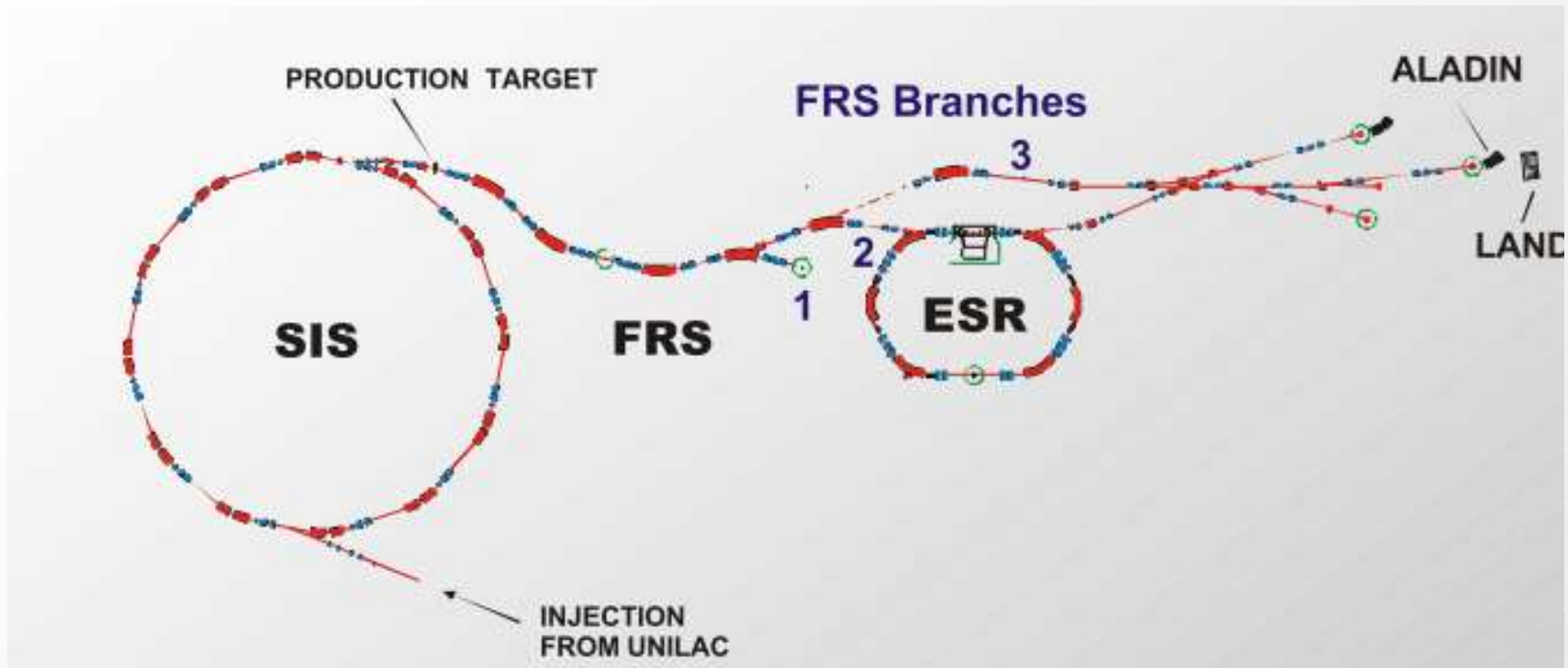
Fragmenty sú v oboch prípadoch separované a formované do rádioaktívneho zväzku.

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. Fragmety 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

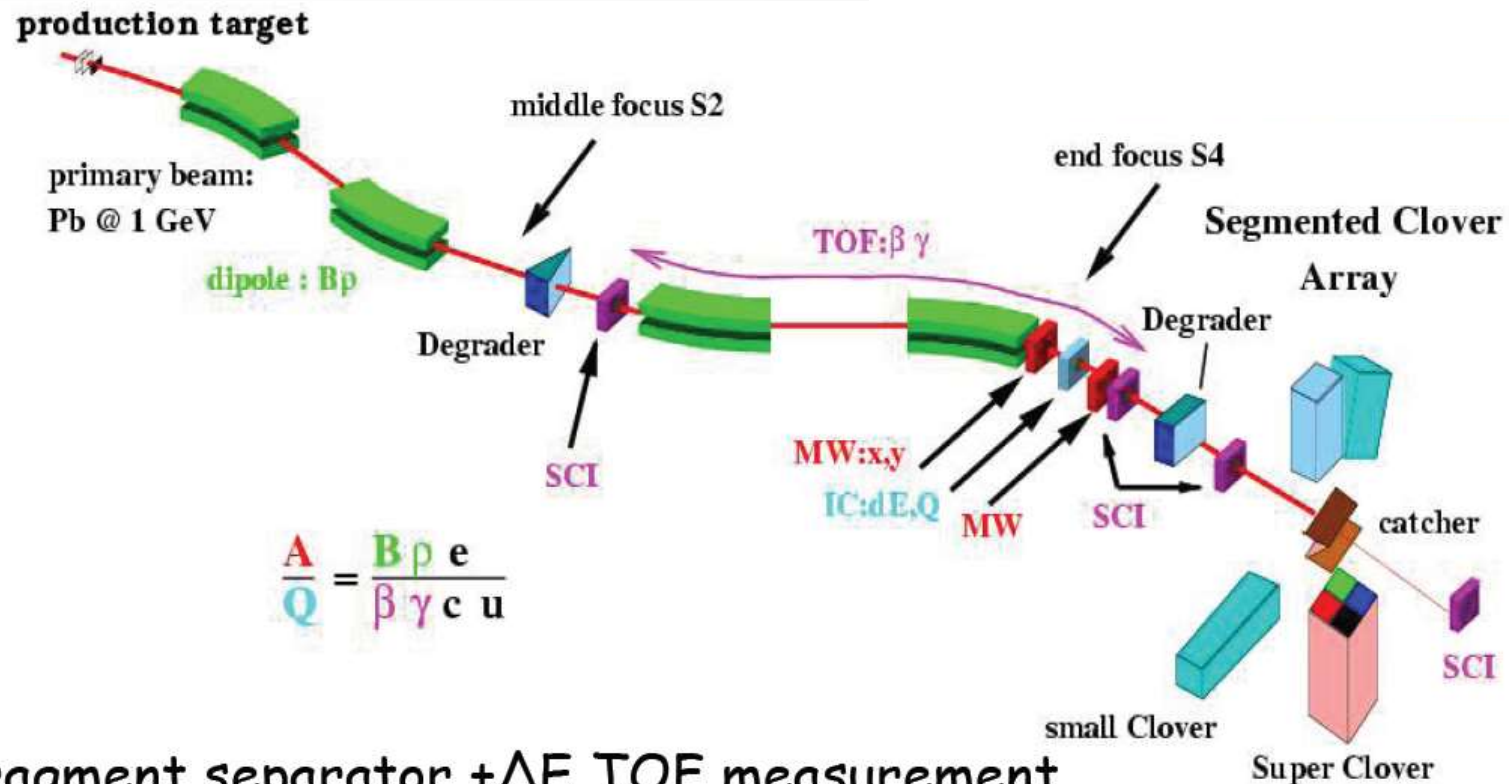
Y. Blumenfeld et al., Phys. Scripta T152, 014023 (2013)

Viacero nových experimentov v štádiu budovania alebo ugradu.

Produkcia jadier fragmentáciou

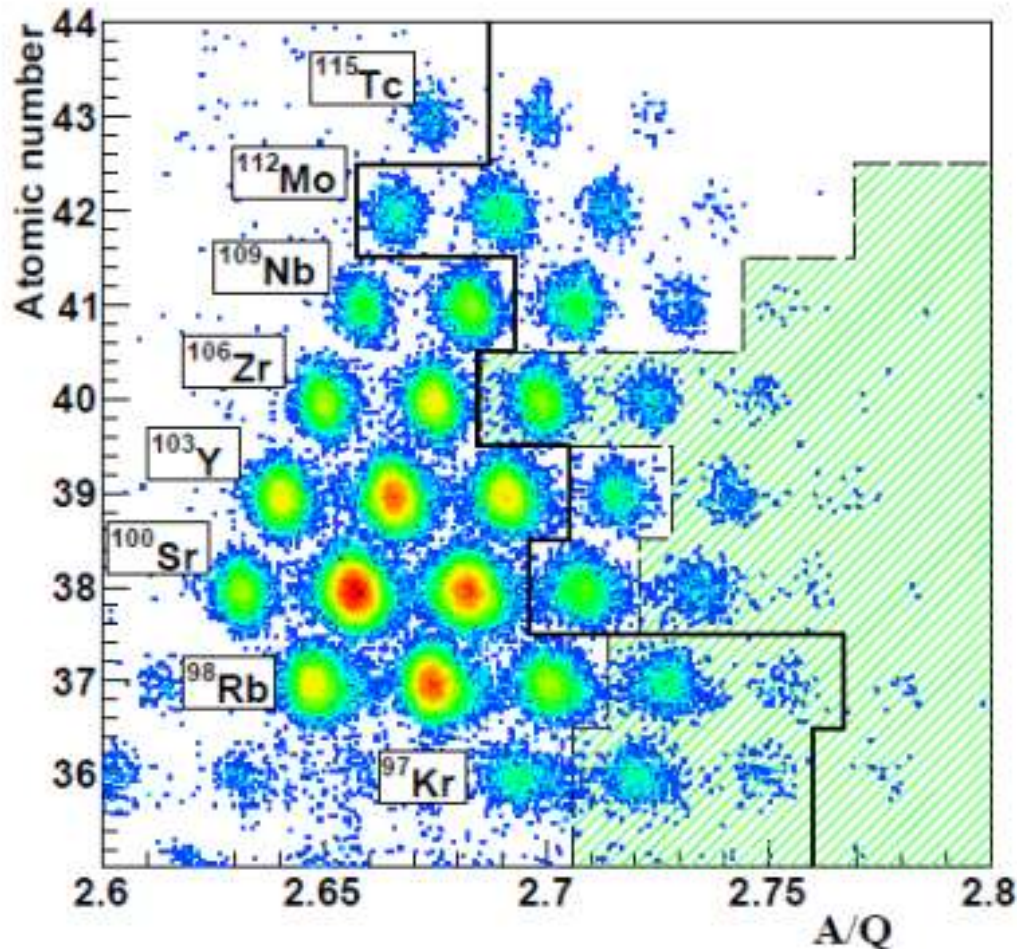


Energia 10 – 100 MeV/u - možnosť študovať izoméry s polčasom výrazne kratším – cca 100 ns.



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)

Oblast' Z = 8 a N = 22



16	S 32.065 +0.134	S 27 21 ms	S 28 125 ms	S 29 187 ms	S 30 1.18 s	S 31 2.58 s	S 32 94.99	S 33 0.75	S 34 4.25	S 35 87.5 s	S 36 0.01	S 37 5.0 m	S 38 2.23 h	S 39 11.5 s	S 40 8.8 s
P 0.973761	P 25 <30 ns	P 26 30 ms	P 27 300 ms	P 28 268 ms	P 29 4.1 s	P 30 2.50 m	P 31 100	P 32 14.26 d	P 33 25.34 d	P 34 12.4 s	P 35 47.4 s	P 36 5.5 s	P 37 2.31 s	P 38 0.64 s	P 39 0.28 s
Si 23 42.9 ms	Si 24 140 ms	Si 25 218 ms	Si 26 2.21 s	Si 27 4.16 s	Si 28 82.223	Si 29 4.685	Si 30 3.092	Si 31 2.62 h	Si 32 172 s	Si 33 6.18 s	Si 34 2.77 s	Si 35 0.78 s	Si 36 0.45 s	Si 37 90 ms	Si 38 >1 μs
Al 22 59 ms	Al 23 470 ms	Al 24 1.07 s	Al 25 7.18 s	Al 26 4.8 s	Al 27 100	Al 28 2.246 m	Al 29 6.6 m	Al 30 3.60 s	Al 31 644 ms	Al 32 33 ms	Al 33 41.7 ms	Al 34 56.3 ms	Al 35 36.6 ms	Al 36 90 ms	Al 37 10.7 ms
Mg 21 122.5 ms	Mg 22 3.86 s	Mg 23 11.3 s	Mg 24 78.99	Mg 25 10.00	Mg 26 11.01	Mg 27 9.46 m	Mg 28 20.9 h	Mg 29 1.30 s	Mg 30 335 ms	Mg 31 220 ms	Mg 32 120 ms	Mg 33 90 ms	Mg 34 20 ms	Mg 35 70 ms	Mg 36 3.9 ms
Na 20 448 ms	Na 21 22.48 s	Na 22 2.503 s	Na 23 100	Na 24 38 ms	Na 25 59.0 s	Na 26 1.07 s	Na 27 304 ms	Na 28 30.5 ms	Na 29 44.5 ms	Na 30 46 ms	Na 31 17.0 ms	Na 32 13.5 ms	Na 33 8.2 ms	Na 34 5.5 ms	Na 35 1.5 ms
Ne 19 17.22 s	Ne 20 90.46	Ne 21 0.27	Ne 22 9.25	Ne 23 37.2 s	Ne 24 3.38 m	Ne 25 802 ms	Ne 26 197 ms	Ne 27 31.5 ms	Ne 28 20.0 ms	Ne 29 15.6 ms	Ne 30 5.8 ms	Ne 31 3.4 ms	Ne 32 3.5 ms	Ne 33 <260 ns	Ne 34 >1.5 μs
F 18 109.7 m	F 19 100	F 20 11.0 s	F 21 4.16 s	F 22 4.23 s	F 23 2.23 s	F 24 0.34 s	F 25 26 ms	F 26 10.2 ms	F 27 4.9 ms	F 28 <40 ns	F 29 2.8 ms	F 30 <260 ns	F 31 >280 ns		
O 17 0.036	O 18 0.205	O 19 27.1 s	O 20 13.5 s	O 21 3.4 s	O 22 2.25 s	O 23 82 ms	O 24 61 ms								
N 16 1.9 s	N 17 4.17 s	N 18 0.63 s	N 19 329 ms	N 20 142 ms	N 21 95 ms	N 22 24 ms	N 23 14.5 ms								
C 15 2.45 s	C 16 0.747 s	C 17 193 ms	C 18 92 ms	C 19 49 ms	C 20 14 ms	C 21 <30 ns	C 22 6.2 ms								
B 14 13.8 ms	B 15 10.4 ms	B 16 <190 · 10 ⁻¹⁹ s	B 17 5.1 ms	B 18 <26 ns	B 19 2.92 ms										
Be 13 0.5 ns	Be 14 4.35 ms														

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

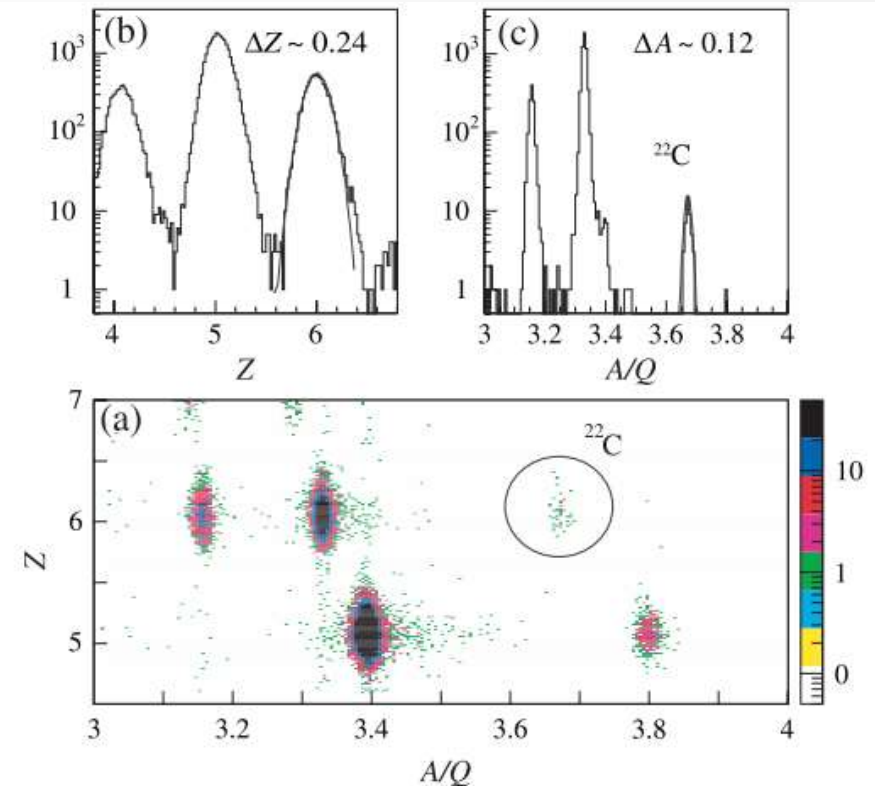


FIG. 1 (color). (a) Two-dimensional plot of Z versus A/Q in front of the reaction target. (b) Z projection of Fig. 1(a). The solid line indicates a Gaussian fit to the Z = 6 peak, yielding a $\Delta Z = 0.24$ in FWHM. (c) A/Q-projection spectrum for the Z = 6 particles. The solid line indicates a Gaussian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

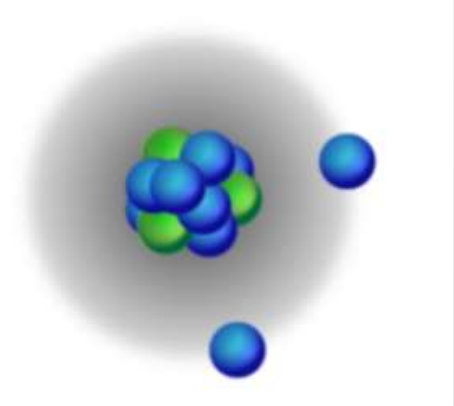


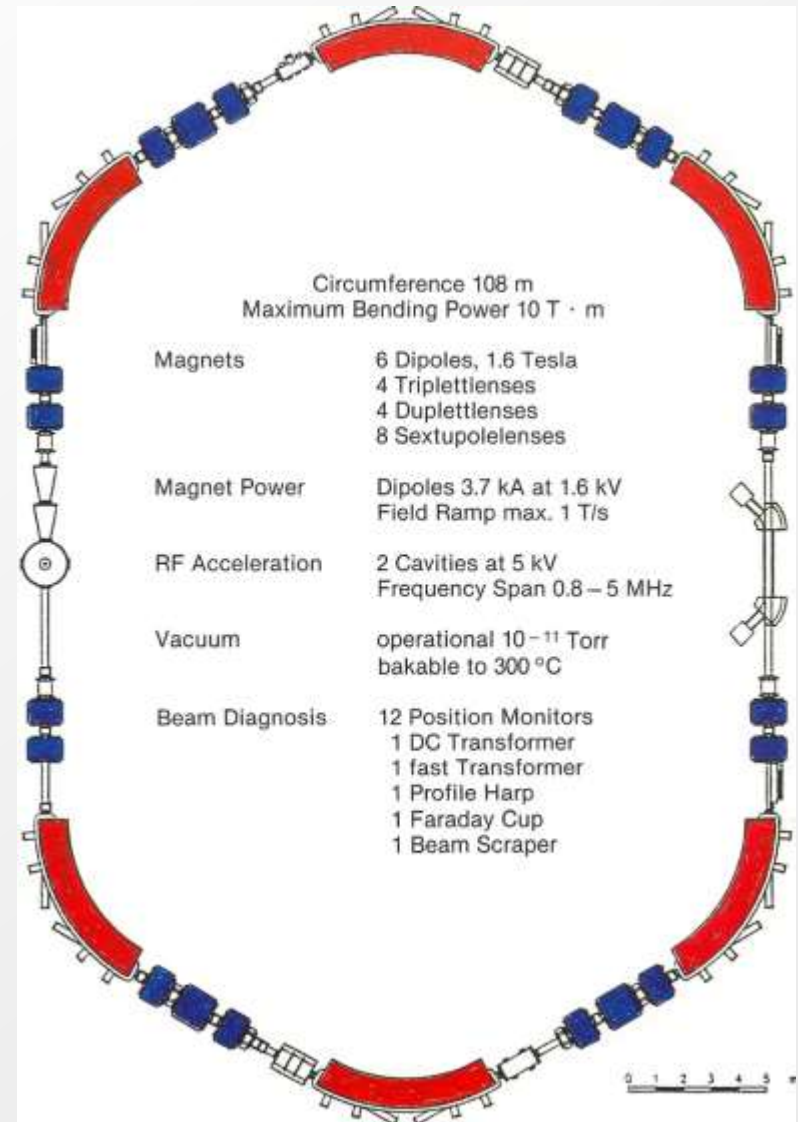
FIG. 1: ^{22}C is now the heaviest observed Borromean nucleus. Borromean nuclei are named after the rings from the 15th century crest of the Borromeo family from northern Italy. The rings are connected in such a way that the cutting of one ring results in the separation of all three. (Left) Marble representation 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

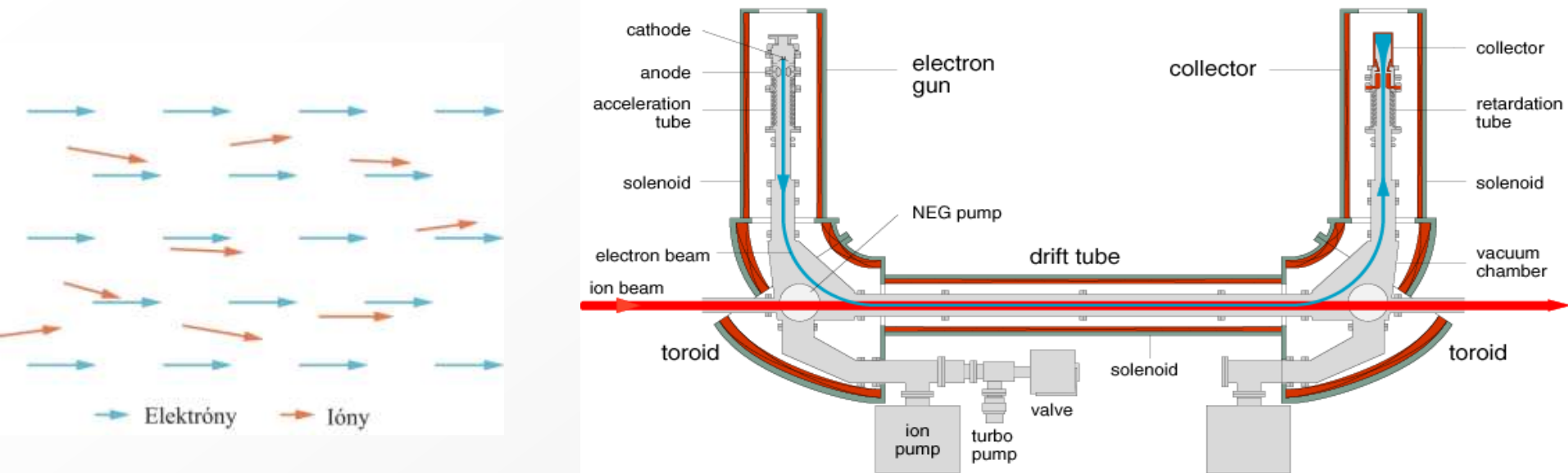


GSI Darmstadt
Experimental Storage Ring

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 iónu 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.



ISOL METÓDY TVORBY RÁDIOAKTÍVNYCH ZVÄZKOV

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)

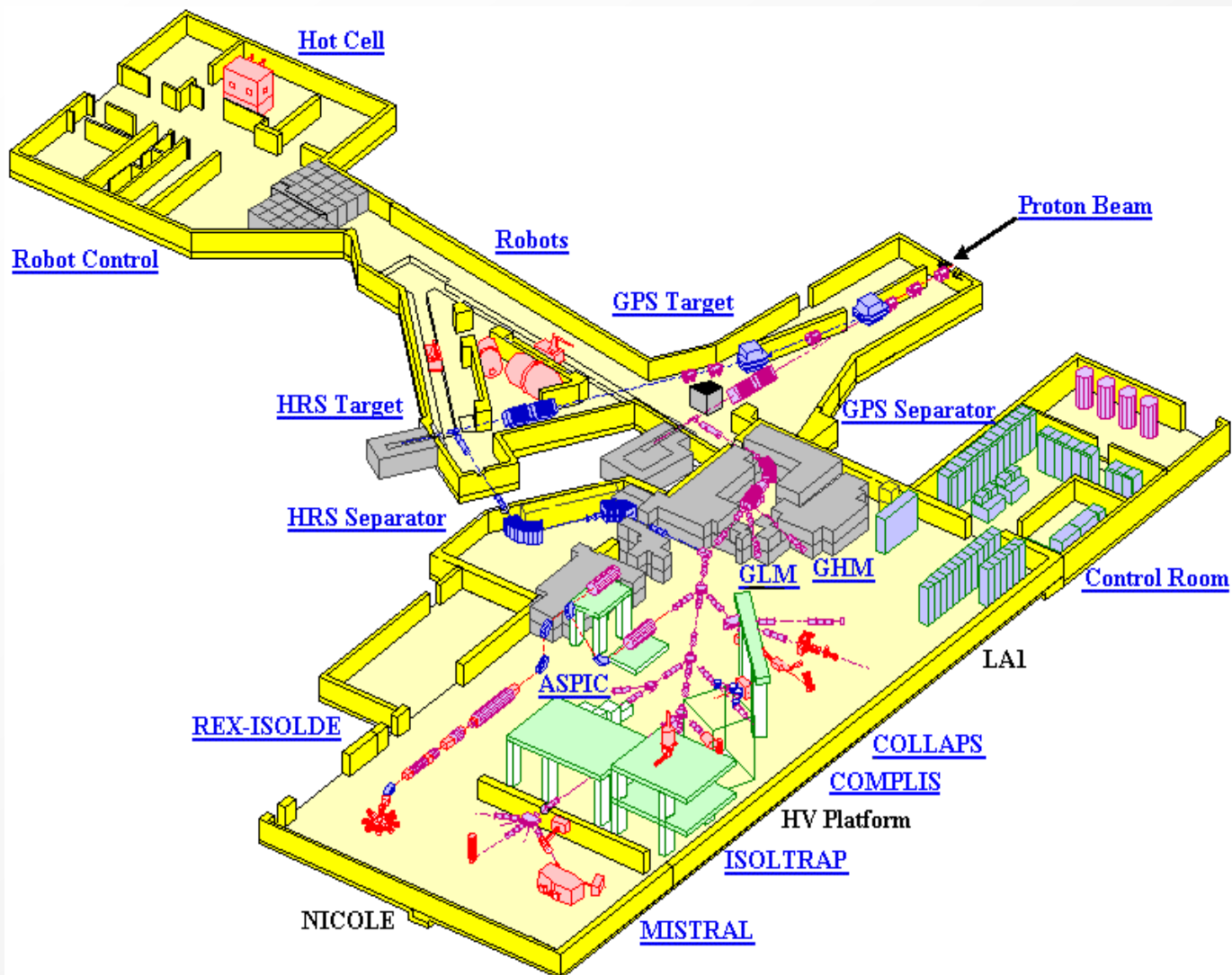
Pripravované projekty

SPES v INFN Legnaro (Taliansko)

SPIRAL2 v GANIL (Caen, Francúzsko)

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

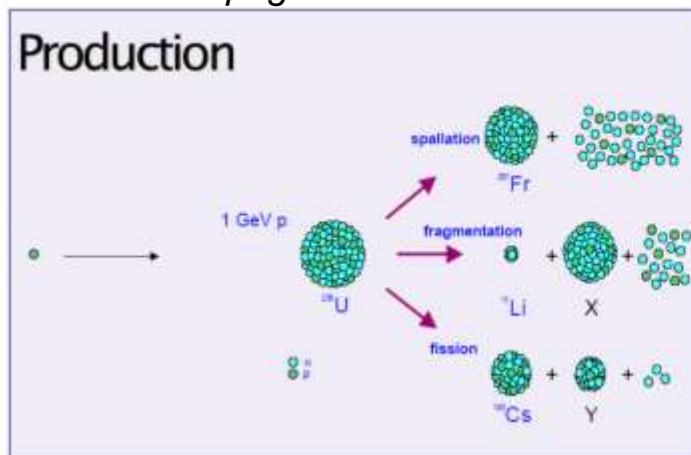
ISOLDE – pure RIB



Produkcia jadier ISOL technickou



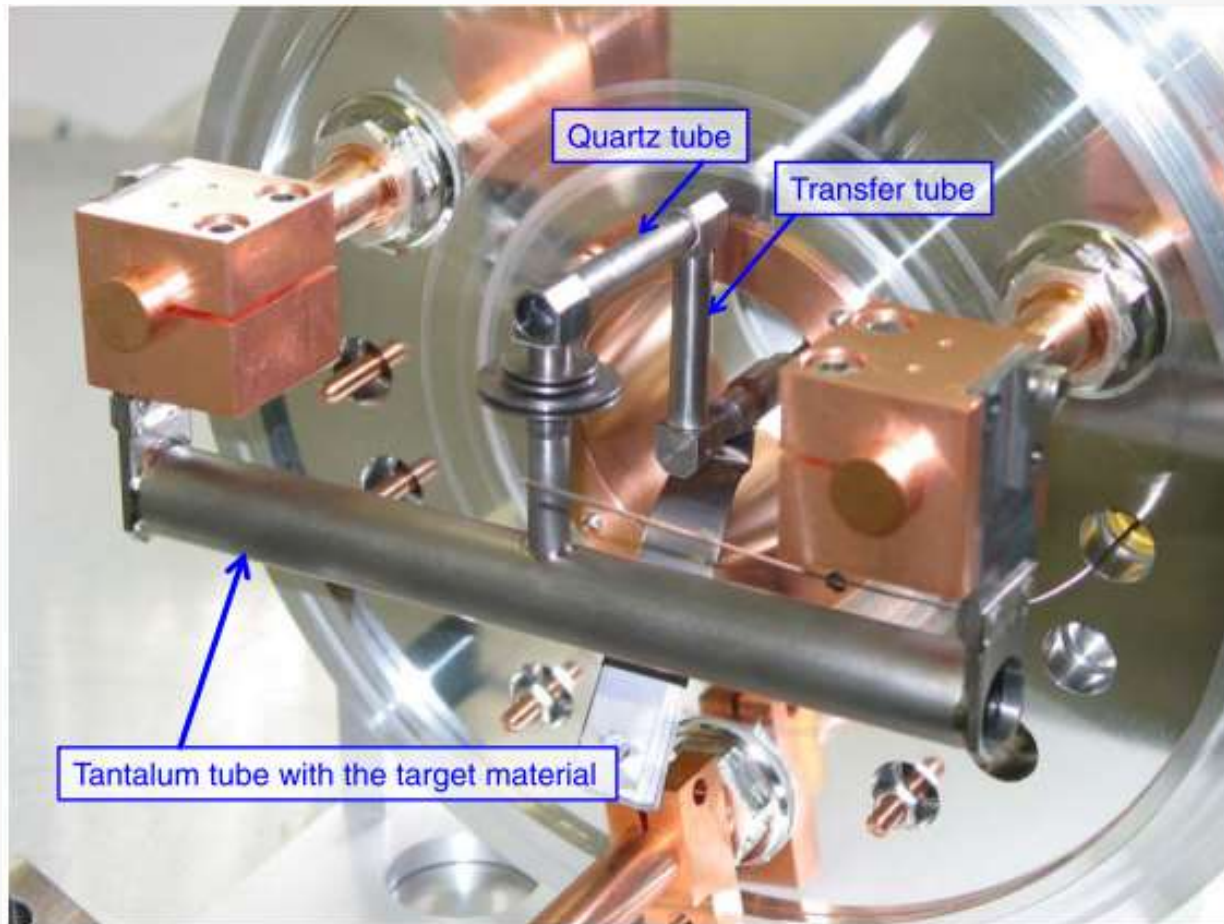
Zdroj: ISOLDE web page



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

Terč

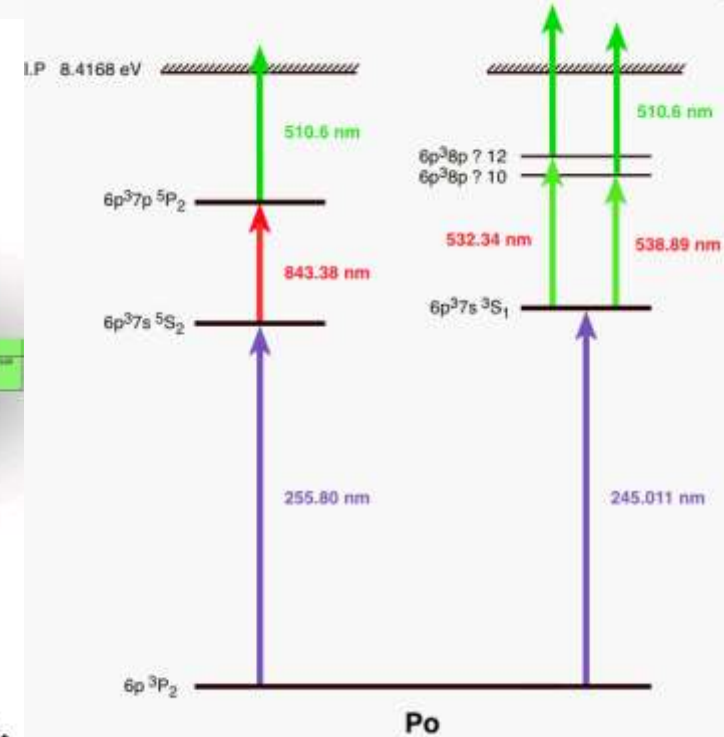
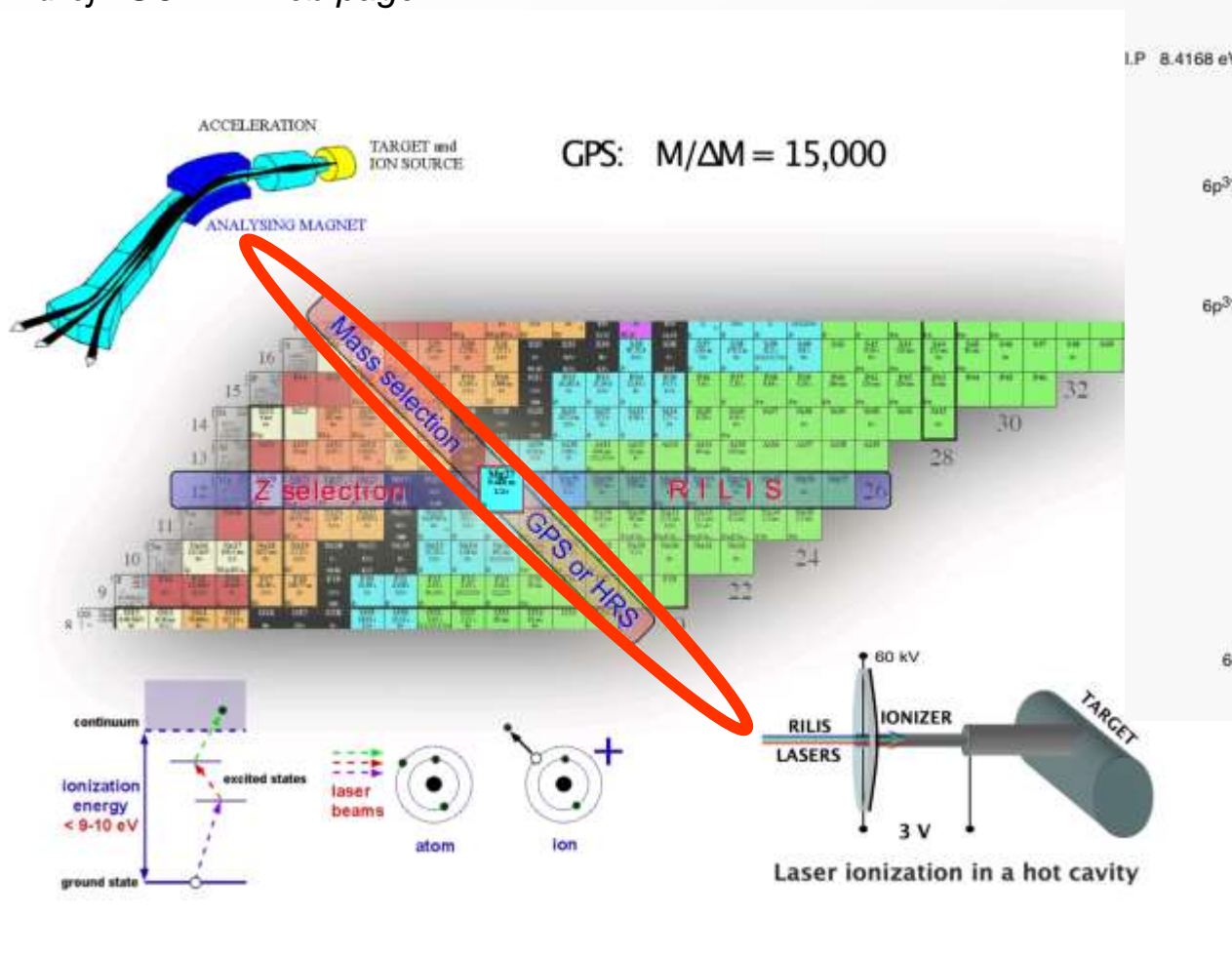


Y. Blumenfeld et al., Phys. Scripta T152, 014023 (2013)

Využitie laseru

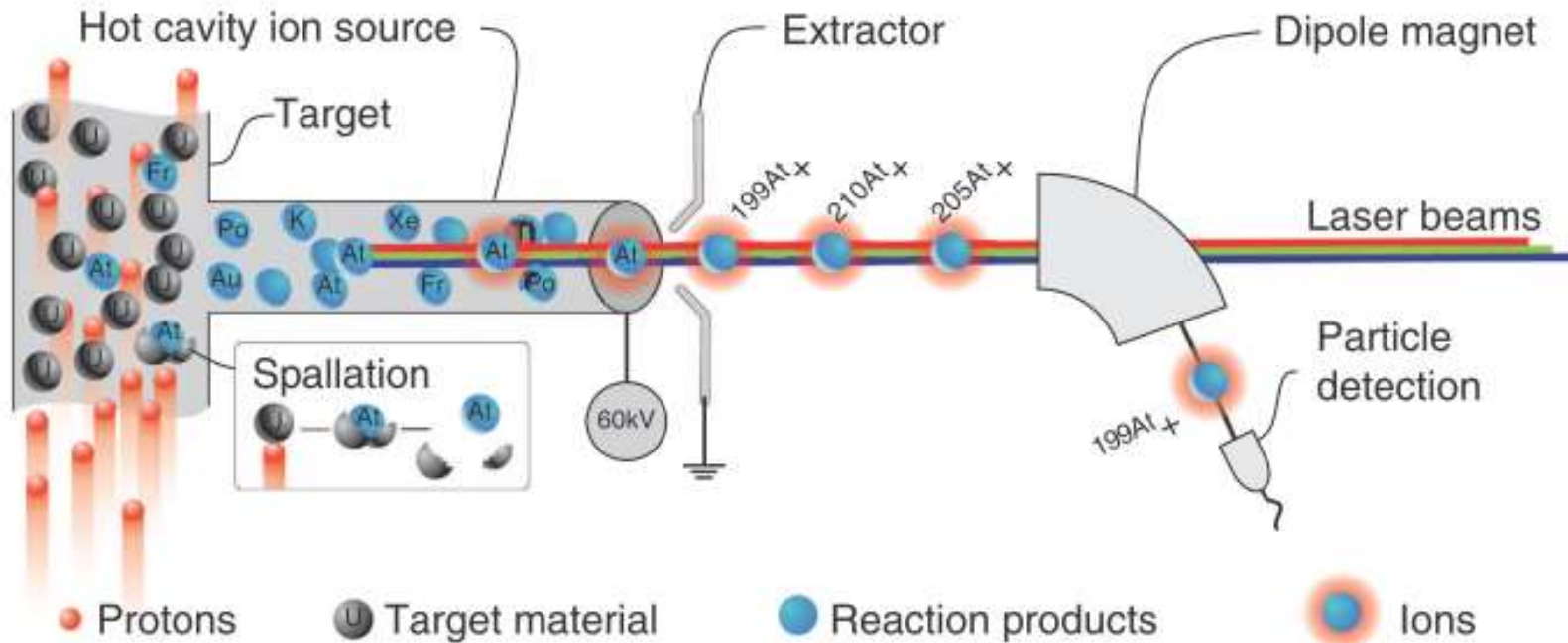


Zdroj: ISOLDE web page



Excitácia atómu pomocou laseru.

Spôsob využitia

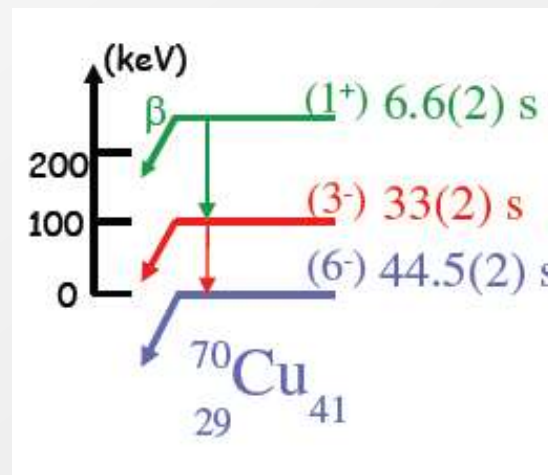
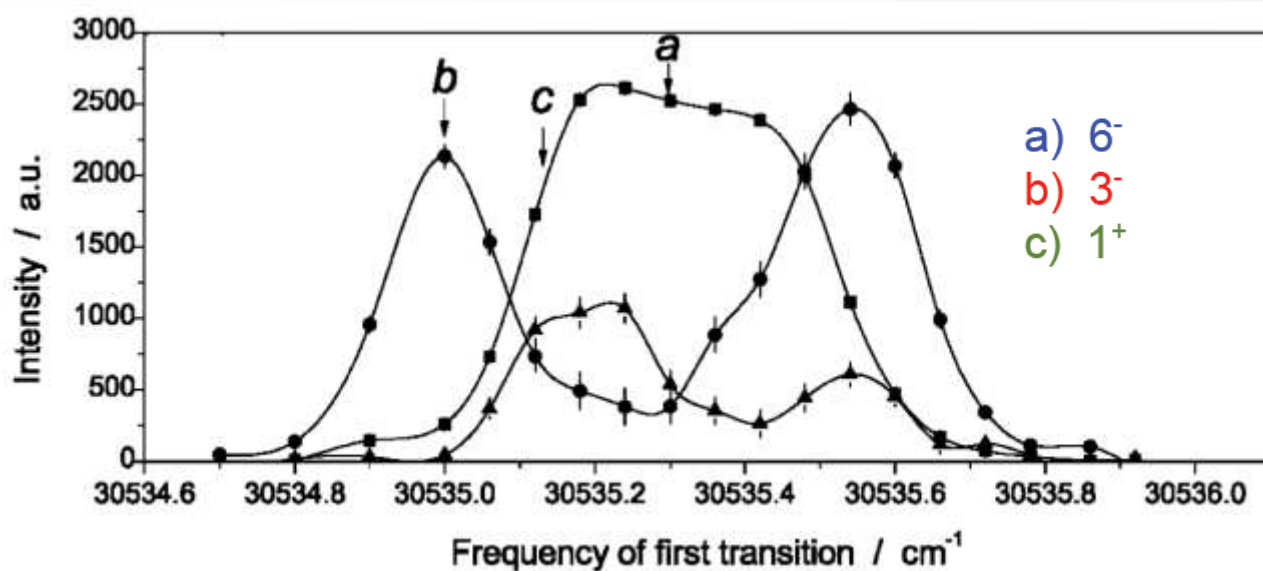


S. Rothe et al. Nature Communications 4, 1835 (2013)

Selekcia izomérených stavov



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



Výhody pre malé zariadenia

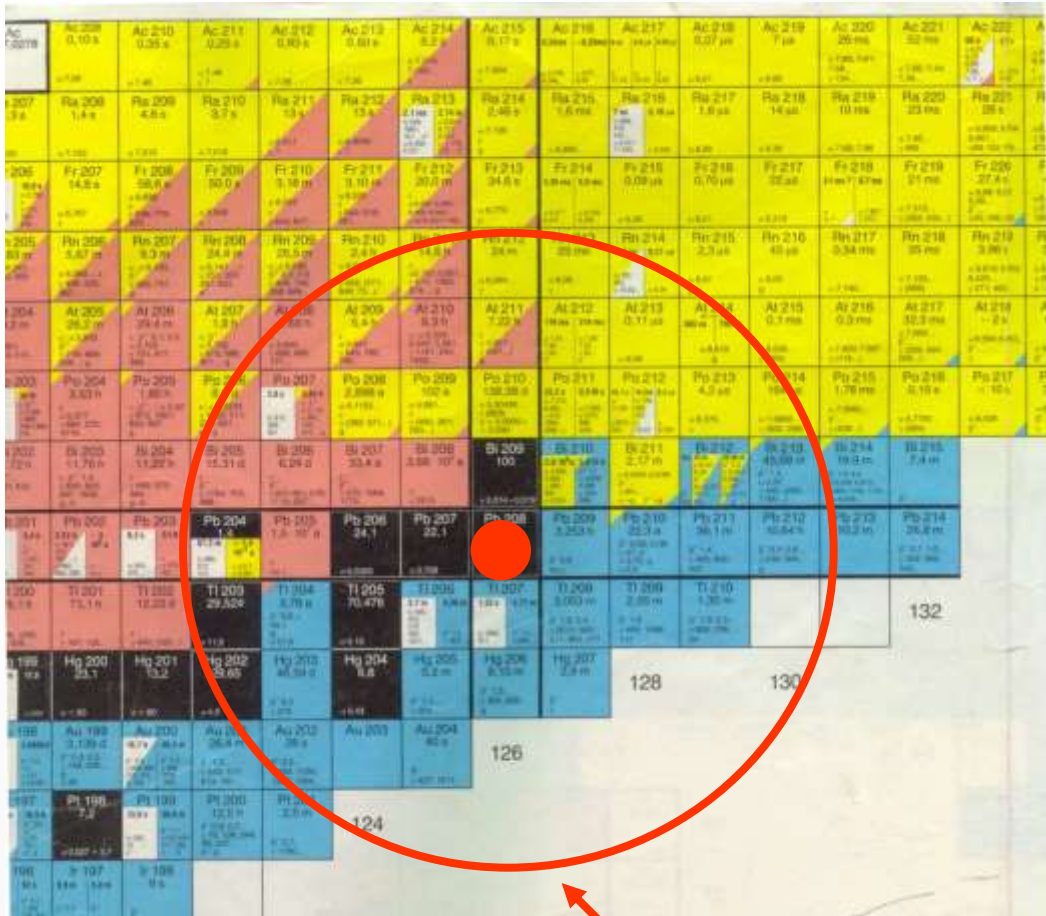


- Technológia je využiteľná aj pre malé zariadenia. Princípom ostáva fragmentácia ťažkých jadier (zvyčajne urán), nie je však potrebná vysoká energia zväzku (za cenu menšieho výťažku RA izotopov)
- Napr. IGISOL v Jyväskylä kde 50 MeV protónový zväzok interaguje s ^{238}U (príp. ^{232}Th). Extrahované 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.



VYŽITIE TRANSFER REAKCIÍ V ŠTÚDII ŠTRUKTÚRY JADIER

Produkcia jadier transfer reakciou



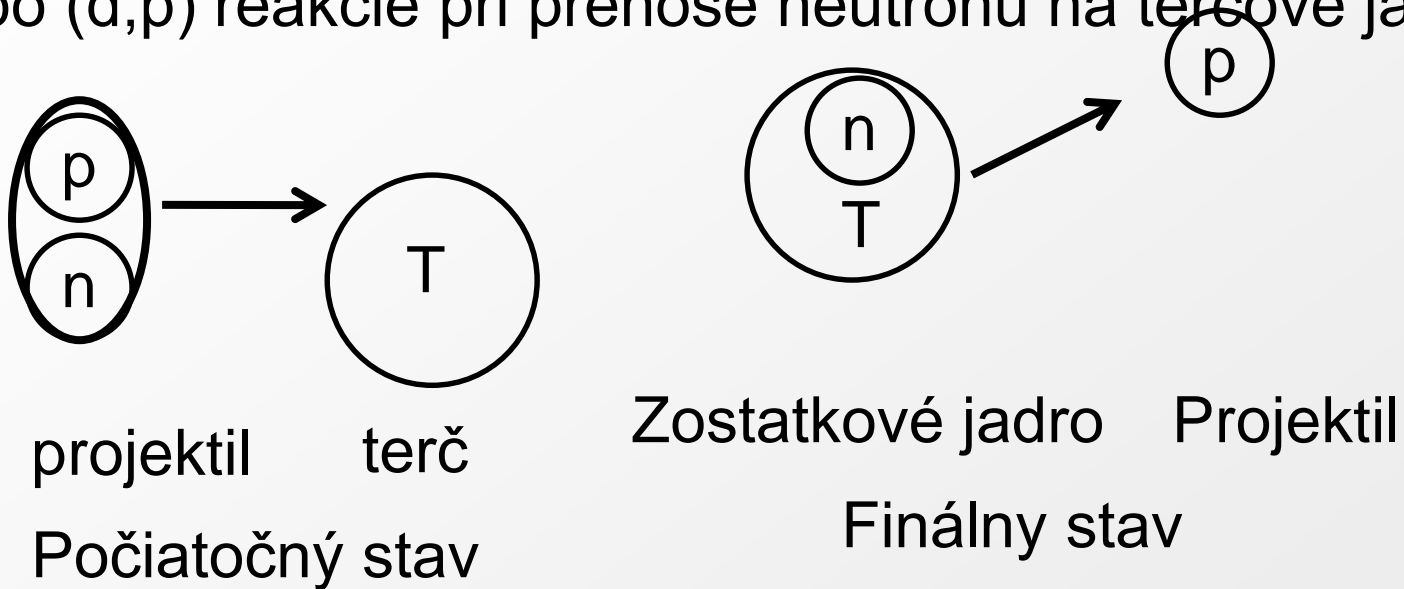
Relevantná oblasť pri použití terča ^{208}Pb

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

Reakcie strhnutia (stripping)



- strhnutie nukleónu z projektilu (stripping reakcie)
- Napr. (d,n) reakcie s prenosom protónu na terčové jadro, alebo (d,p) reakcie pri prenose neutrónu na terčové jadro



- Tzv. (d,p) reakcie boli prvý krát opísane už v roku 1951 a sú významným zdrojom informácií o štruktúre jadier.

Využitie stripping reakcií



- Vedú zvyčajne na vzбудené stavy s energiou rádovo niekoľko MeV
- Umožňujú tak študovať nízko ležiace hladiny a priniesť informácie pre konfrontáciu s vrstvovým modelom.
- Z energetickej bilancie reakcie sa môžu získať energie obsadzovaných hladín.
- Z uhlovej distribúcie je možné získať informáciu o spine a parite obsadzovaného stavu.
- Z relatívneho výťažku pre jednotlivé stavy môžeme získať spektroskopický faktor (a teda aj informáciu o čistote stavu

(d,p) reakcia



Aké informácie môžeme získať?

Excitačné energie obsadzovaných stavov

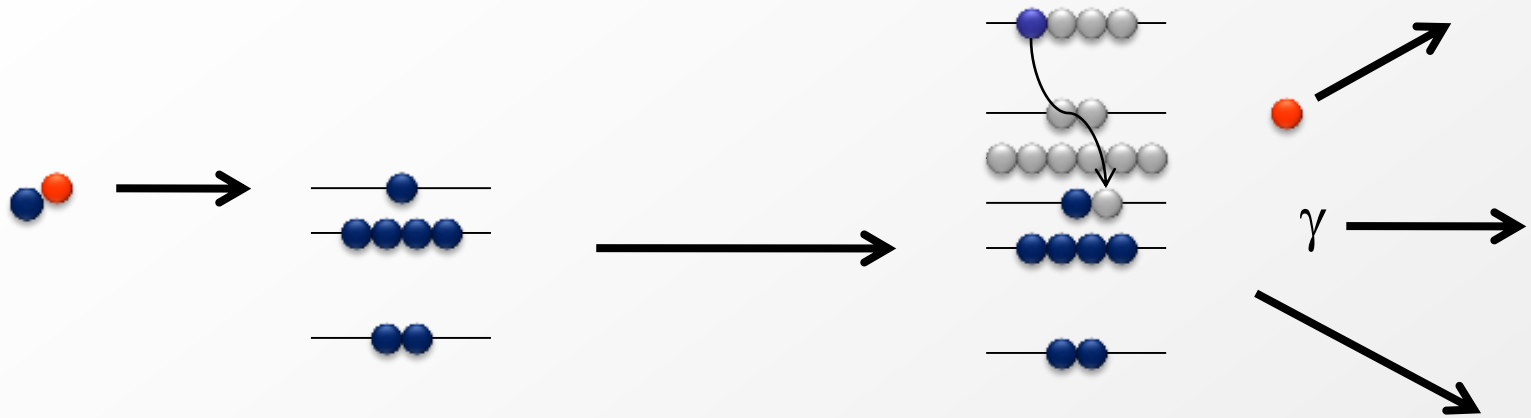
Uhlovú distribúciu produktov reakcie

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.

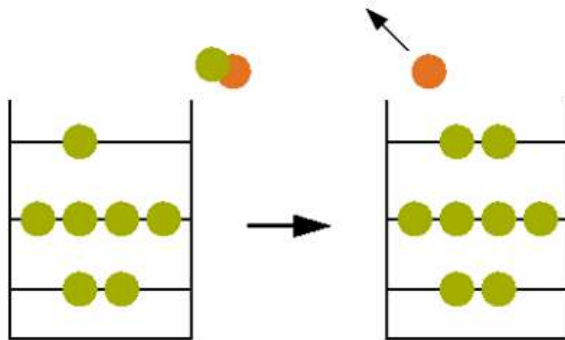
Použitie inverzných reakcií



- Pri štúdiu jadrovej štruktúry je nezriedka nemožné využiť ako terčové jadro rádioaktívny izotop.
- Napríklad štúdium nízkoležiacich hladín izotopu ^{31}Mg ($T_{1/2} \cong 230$ ms) by nikdy nebolo realizovateľné.
- Riešením je vytvorenie rádioaktívneho zväzku ^{30}Mg ($T_{1/2} \cong 335$ ms) a jeho sekundárna interakcia s deutériovým terčom (tvoreného napr. zlúčeninami na báze s uhlíkom) za vzniku vzбудeného jadra ^{31}Mg .



Transfer reaction and in-beam



- study single particle properties
- complementary to Coulomb excitation

Observables:

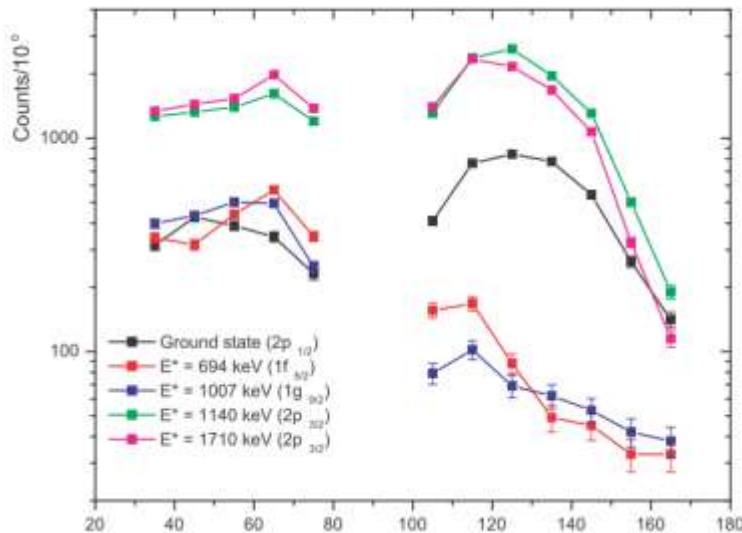
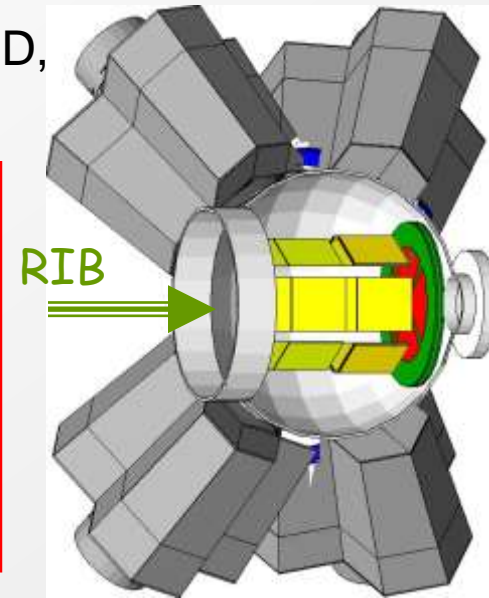
- excitation energy of populated state
- angular distribution
→ angular momentum transfer
- relative population
→ spectroscopic factor
- decay by γ rays

transfer with radioactive beams requires:

- target with deuterons or tritons
- 0° spectrometer for ejectile
or
- 4π coverage for recoils
- particle identification for α , t, d, p
- high efficient Germanium array

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

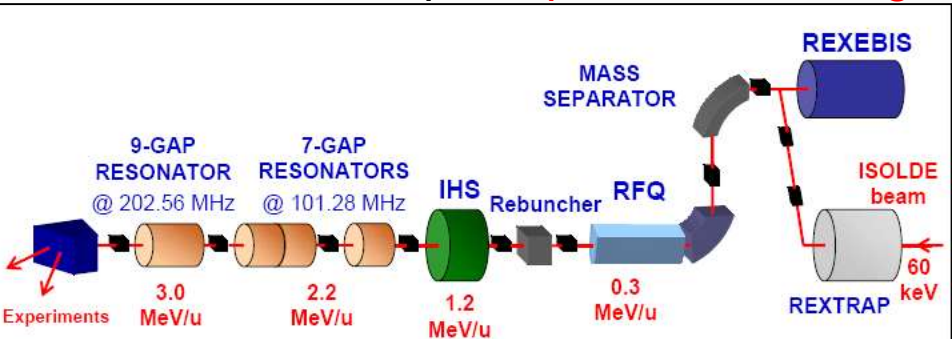
- **Coulex reactions (e.g. Hg, Rn)**
- **Transfer reactions**
- **Fusion reactions**
- **Stellar reaction rates**
- **Reactions with isomeric beams**
- **Recoil spectrometer**



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)

