



Wyzwania i nowe możliwości dla polskiej nauki w ośrodku FAIR

Zjazd Fizyków Polskich
Gdańsk 1-7.09.2023

P. Salabura

Wydział Fizyki Astronomii i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Jagielloński, Kraków

- ✓ Infrastruktura badawcza
- ✓ Program naukowy
- ✓ Stan realizacji
- ✓ Polski wkład

FAIR : powstanie , organizacja udział Polski



Podpisanie konwencji FAIR w Wiesbaden w 2010



Zakup akcji przez polskiego udziałowca w 2013

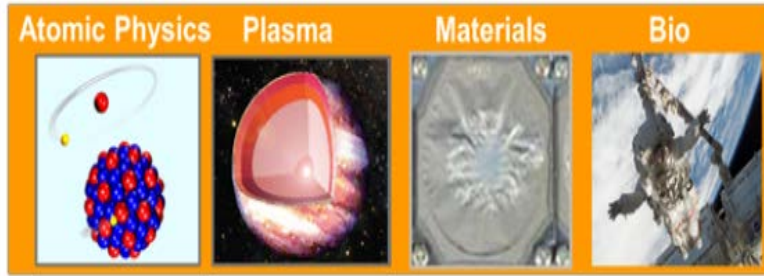
- FAIR funkcjonuje jako spółka 9 udziałowców z radą nadzorczą **FAIR Council** (w projekcie bierze udział ponad 200 Instytucji z 53 krajów świata)



 partner stowarzyszony  aspirujący

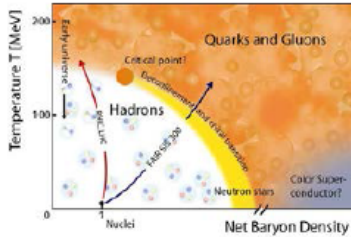
- Polska posiada 2.3% udziałów i jest reprezentowana przez Uniwersytet Jagielloński koordynujący polskie wkłady rzeczowe w FAIR finansowane przez MEiN (około 23.7 Mln Euro @2005) Ponad 95% środków jest przeznaczonych na wkłady rzeczowe w infrastrukturę badawczą i eksperymenty na FAIR <https://fair.uj.edu.pl/>
- Krajowe Konsorcjum Femtofizyka skupia 12 polskich uczelni i instytutów badawczych <https://fair.uj.edu.pl/konsorcjum>
- FAIR jest wpisane na mapę drogową europejskiej i polskiej infrastruktury badawczej

FAIR: program naukowy

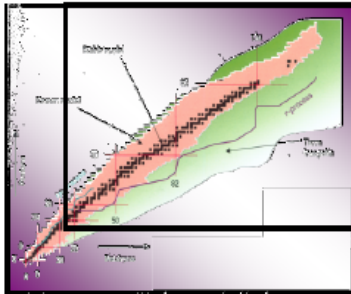


Atomic Physics, Plasma physics
and applications

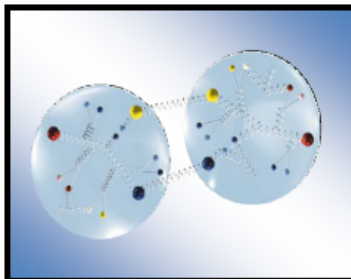
APPA



Compressed Baryonic Matter **CBM**



Nuclear Structure
Astrophysics and Reactions **NuSTAR**



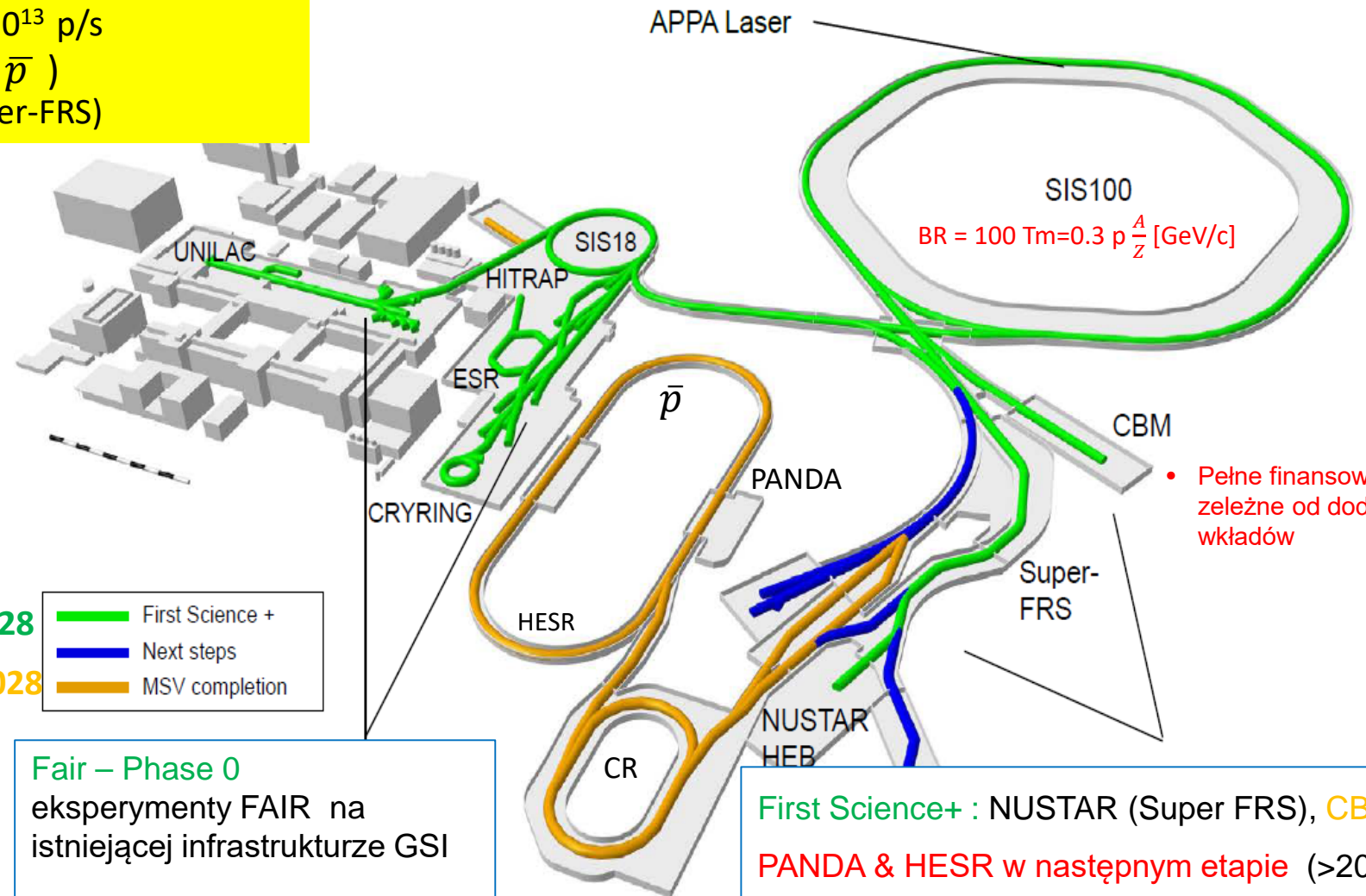
hadron structure with Antiproton
ANihilation (at DArmstadt)

PANDA



FAIR: struktura infrastruktury badawczej

- ✓ Synchrotrony SIS18 - SIS100 → energia protonów do 29 GeV, U^{92+} do 10 GeV/u (~ 200 magnesów nadprzewodzących, 11 ton ciekłego helu, 70 MW)
- ✓ duża intensywność: 10^{10} jonów/s (U^{92+}), 10^{13} p/s
- ✓ pierścienie akumulacyjne (jony , jądra , \bar{p})
- ✓ wiązki radioaktywne, separator mas (Super-FRS)



• Pełne finansowanie CBM zależne od dodatkowych wkładów

- 2028 — First Science +
- >2028 — Next steps
- MSV completion

Fair – Phase 0
eksperymenty FAIR na istniejącej infrastrukturze GSI

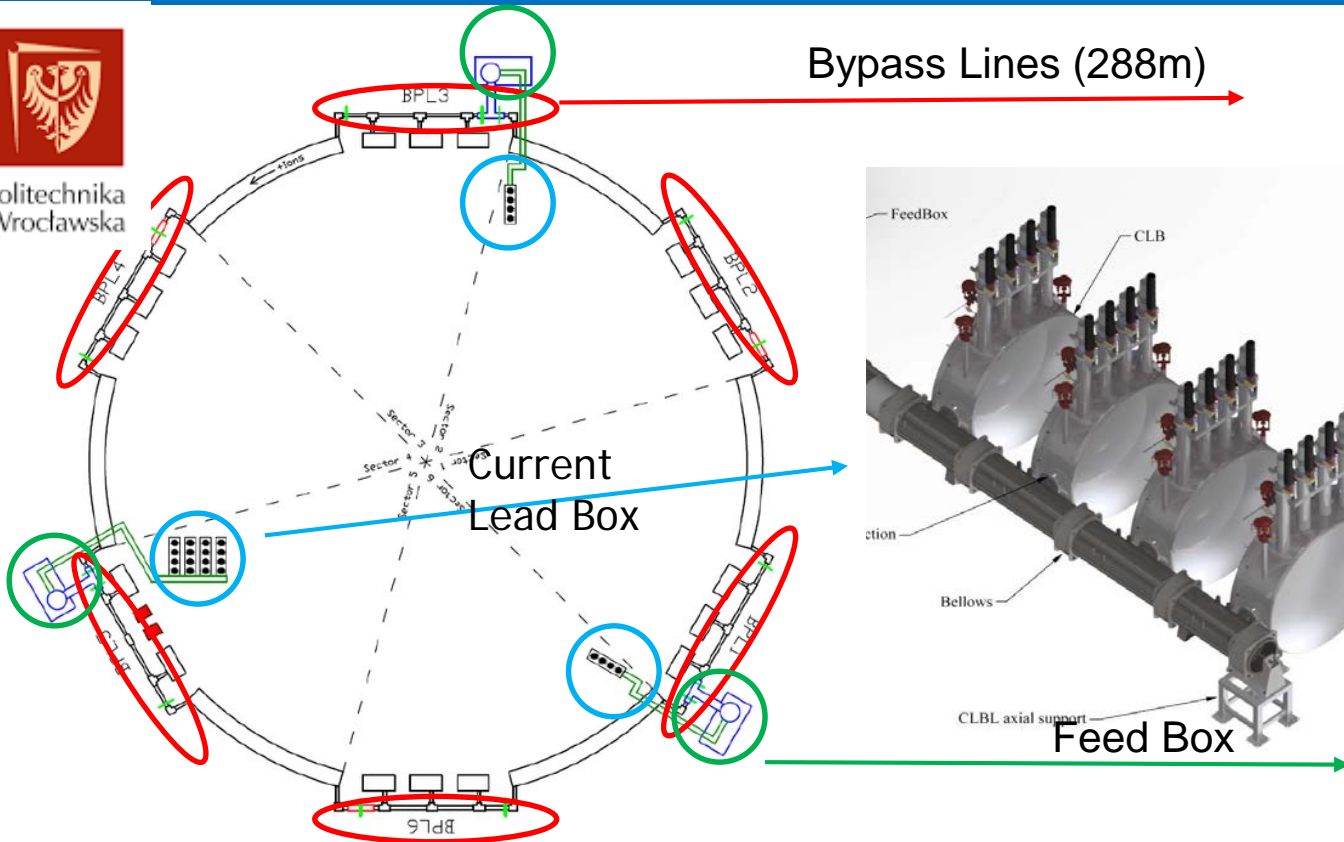
First Science+ : NUSTAR (Super FRS), CBM , APPA
PANDA & HESR w następnym etapie (>2028)
(w dyskusji fizyka z wiązką protonów)

- **Realizacja etapowa** rekomendowana przez raport komisji Heuer/Tribble (2022) z **I etapem First Science +** wsparta przez FAIR Council jako „the most appropriate starting scenario to achieve world leading science”
- Dostępny budżet 2.8 mld Eur (nowy wkład 0.58 Mld Niemiec) umożliwia realizację First Science **bez CBM (dodatkowe 40 mln)**. **Finansowanie zależne od dodatkowych wkładów udziałowców**

Polski wkład rzeczowy w SIS100



Politechnika Wroclawska



Bypass Lines (288m)

Current Lead Box

Feed Box

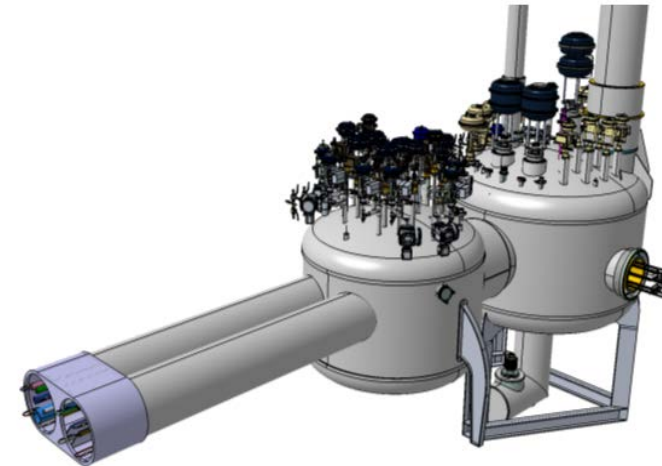
Cross-section of the Cryogenic Bypass Line

Thermal Shield (TS):
temperature 80 K

Vacuum Vessel (VV):
temperature 293 K

Process Pipes (PP):
5 pipes providing
helium (4K and 50K)
to the magnets

Bus Bars (BB):
4 pairs of NbTi
superconductors,
temperature 4 K

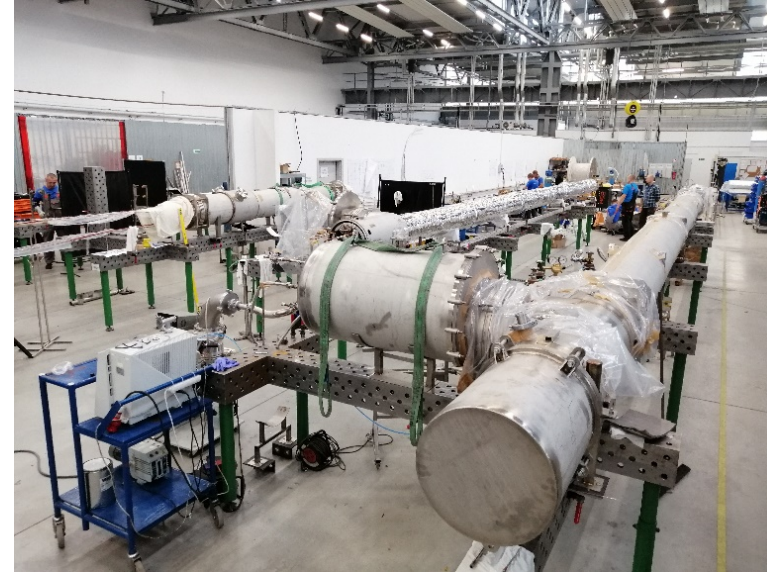
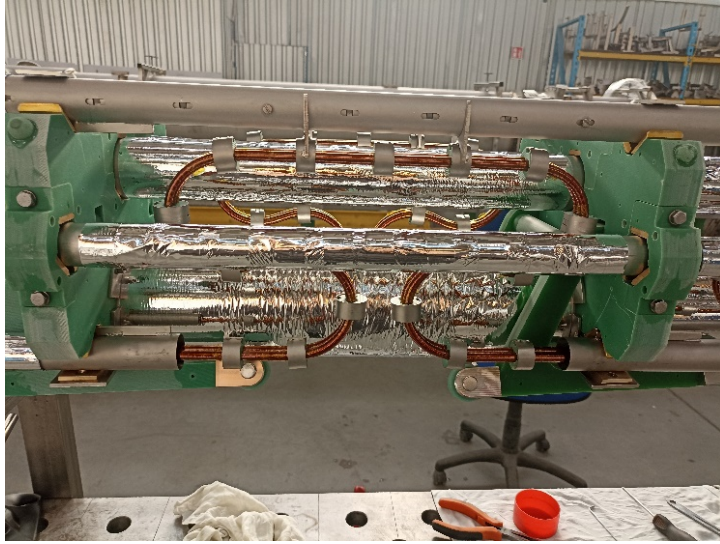


Politechnika Gdańska: system testowy magnesów SIS100

Politechnika Wroclawska: Projekt oraz wykonanie systemu dystrybucji zasilania (prądu) i chłodzenia (He) dla magnesów SIS100: Unikatowe kompetencje łączące niskie temperatury z nadprzewodnictwem (transport helu i prądu w pojedynczej izolacji próżniowej).

Wkład kluczowy dla First Science+

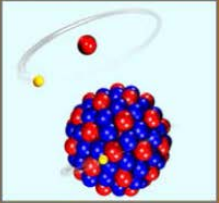
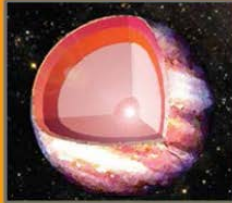


Produkcja elementów systemu kriogenicznego dla SIS100 oraz nadprzewodnikowych kabli w Kriosystem sp. z o.o., Wrocław



Politechnika
Wroclawska

✓ Produkcja BPL
na ukończeniu

APPA (Atomic, Plasma Physics and Applied Sciences)

| Atomic Physics | Plasma | Materials | Bio |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| SPARC strong field research ... probing fundamental laws of physics | HED warm dense matter ... states of matter common in astrophysical objects | MAT/BIOMAT radiation hardness ... mechanical and electrical degradation of materials | BIO/BIOMAT space travel ..cosmic radiation risk and shielding particle therapy radioactive beams FLASH therapy |

SPARC

Atomic Physics
430 naukowców z 26 krajów

HED

Plasma Physics
200 naukowców z 11 krajów

BIOMAT

Biofizyka i badania materiałowe
150 naukowców z 20 krajów

Udział polskich grup badawczych



APPA White Paper NIMB 365 2015 680



APPA at FAIR: From fundamental to applied research



Th. Stöhlker^{a,b,c,*}, V. Bagnoud^{a,b}, K. Blaum^d, A. Blažević^a, A. Bräuning-Demian^{a,e}, M. Durante^a, F. Herfurth^a, M. Lestinsky^a, Y. Litvinov^a, S. Neff^{a,f}, R. Pleskac^a, R. Schuch^g, S. Schippers^h, D. Severin^a, A. Tauschwitz^a, C. Trautmann^{a,d}, D. Varentsov^a, E. Widmannⁱ, on behalf of the APPA Collaborations

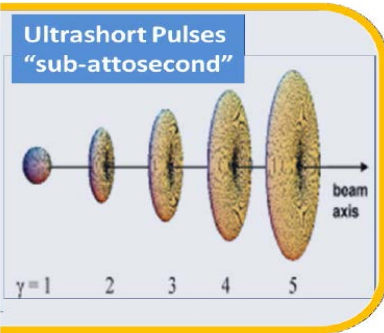
Obszary badań

- Precyzyjne testy QED w nieperturbacyjnym obszarze oraz pomiary stałych przyrody (**SPARC**)
- Badanie plazmy atomowej w kontekście zrozumienia procesów syntezy w astrofizyce „warm-dense-matter” (**HED**)
- Nowe techniki radioterapii z użyciem wysokoenergetycznych wiązek jonów oraz badanie wpływu promieniowania na komórki (podróże kosmiczne) (**BIOMAT**)
- Badania wpływu intensywnego i twardego promieniowania na właściwości materiałów oraz procesów syntezy (**MAT**)

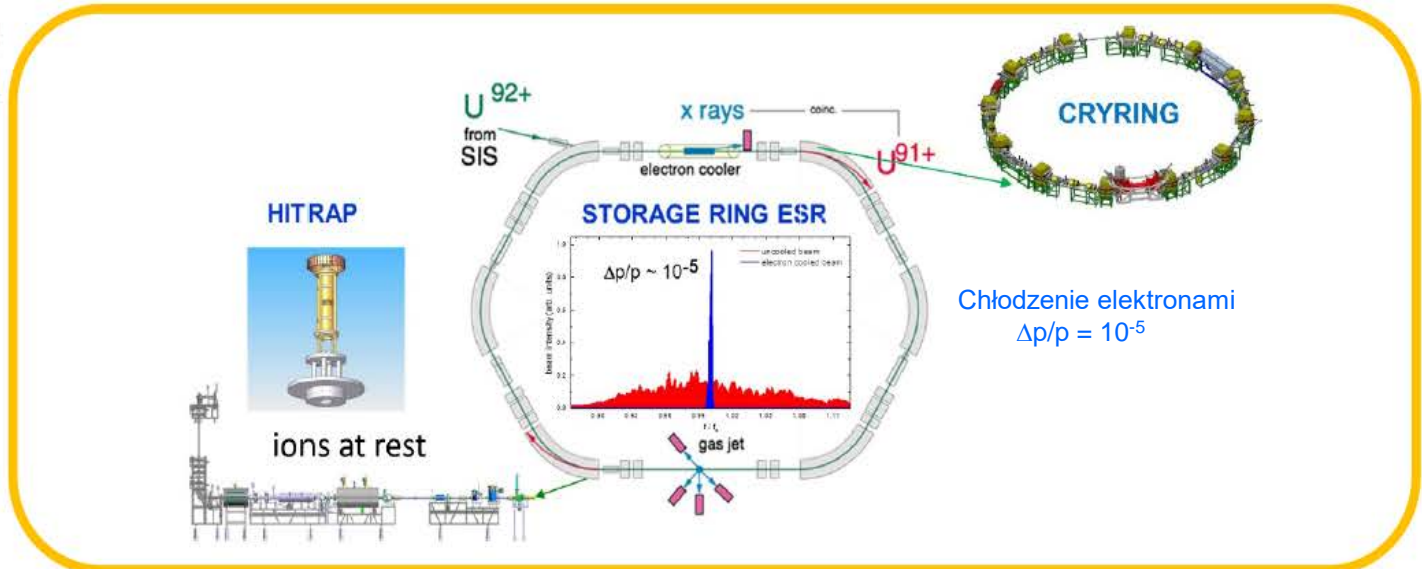
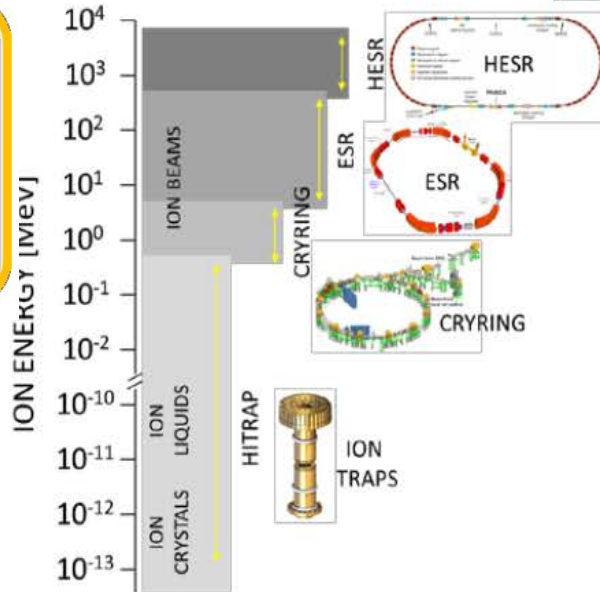
Fizyka atomowa na pierścieniach akumulacyjnych

- ✓ Wysokie stany ładunkowe (np. U^{92+})
- ✓ precyzyjna selekcja prędkości oraz jonów (Q,M)
- ✓ olbrzymi zakres energii od 10^{-13} eV – 5 GeV
- ✓ spektroskopia stanów elektronowych
- ✓ pomiary czasów życia jonów, jader
- ✓ generacja attosekundowych silnych pól EM przez relatywistyczne jony

Pierścienie akumulacyjne

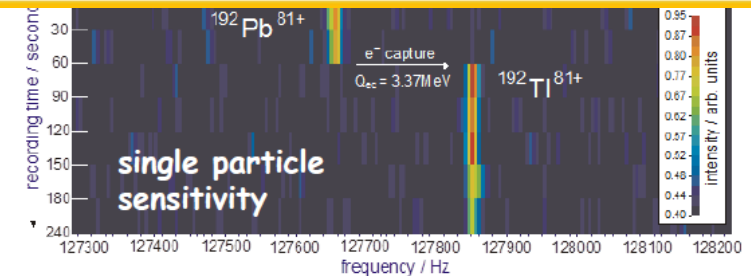


Ultraszybkie pulsy relatywistycznych jonów



Chłodzenie elektronami $\Delta p/p = 10^{-5}$

Precyzyjna selekcji



SPARC: QED w ekstremalnie silnych polach

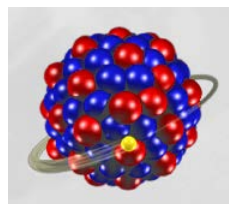
SPARC bada fizykę atomów w ekstremalnie silnych polach elektromagnetycznych statycznych i bardzo szybko się zmieniających

Wodór



$Z=1$; $E_b = 13.6 \text{ eV}$,
 $Z\alpha \sim 10^{-2}$, $\Delta E_{\text{QED}} \approx 10^{-6} \text{ eV}$

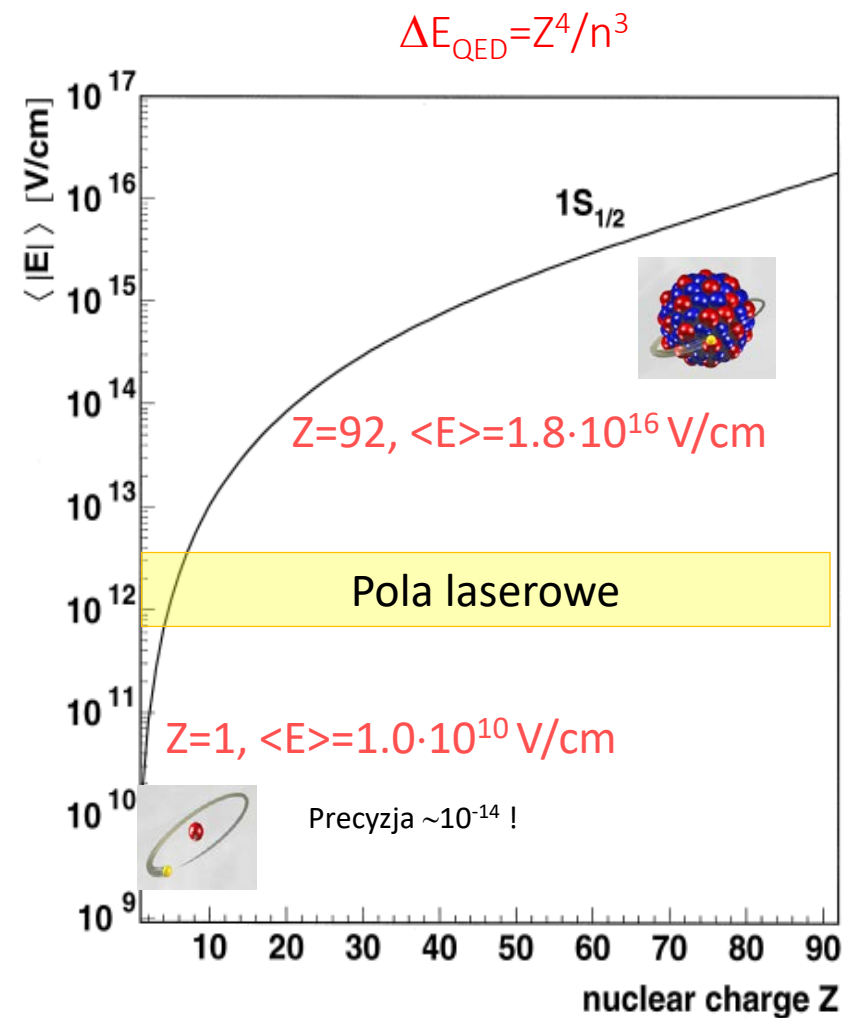
Wodoropodobny Uran



$Z=92$; $E_b = 132 \text{ keV}$,
 $Z\alpha \sim 1$, $\Delta E_{\text{QED}} \approx 500 \text{ eV}$

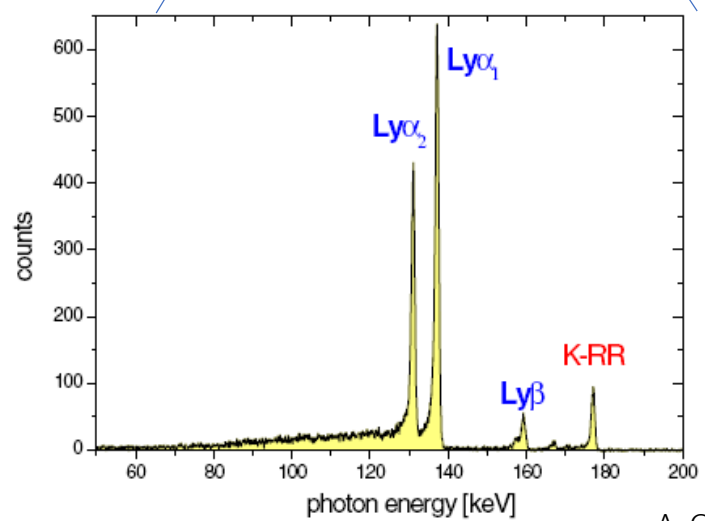
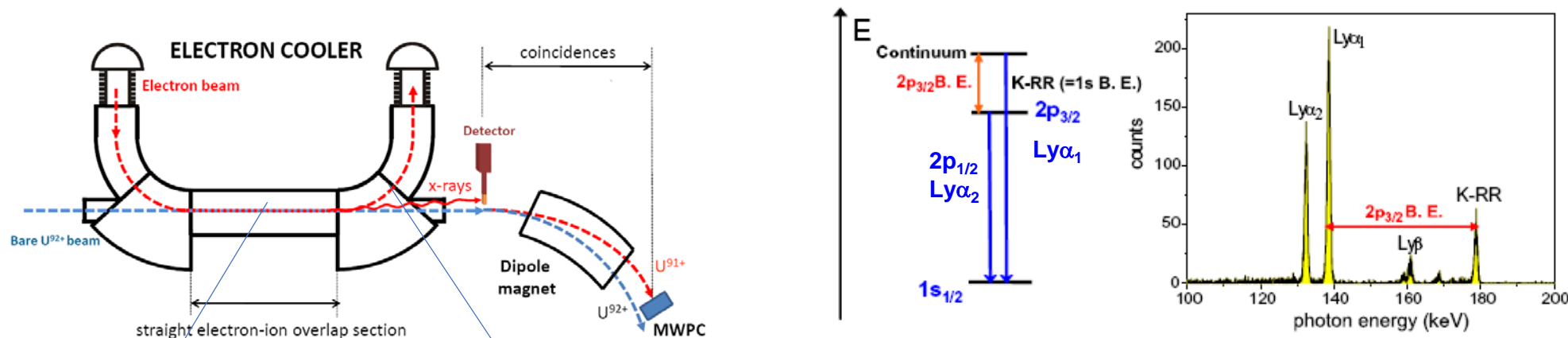
Struktura atomowa i dynamika przejść atomowych

- Precyzyjne testy QED : poprawki wyższego rzędu
- Struktura nad-subtelna (efekty jądrowe) w ciężkich atomach
- Przejścia atomowe indukowane przez ultraszybkie (attosekundowe) pola (relatywistyczne jony)
- Procesy wychwytu elektronów –odwrotne w czasie do jonizacji
- Układy kilku-eletronowe

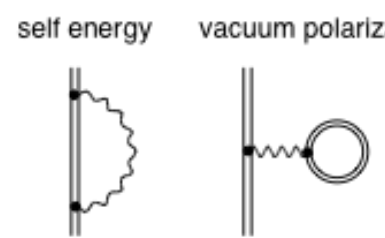


Przykład: pomiar przesunięcia Lamba w ESR

Przesunięcie 1s -Lamba w wodoropodobnym Uranie z przejść K-RR and Ly α_1



$$\Delta E = \frac{\alpha}{\pi} (\alpha Z)^4 F(\alpha Z) mc^2$$



| | |
|---------------------|--------------|
| Finite nuclear size | 198.81 |
| 1-st order QED | 266.45 |
| 2-nd order QED | -1.26(33) |
| Total theory | 464.26 ± 0.5 |
| This work | 460.2 ± 4.6 |

Wynik czuły na wkłady QED pierwszego rzędu (w α)
Najbardziej czuły test QED dla stanu jedno-elektronowego stanu
związanego w układach z dużym Z

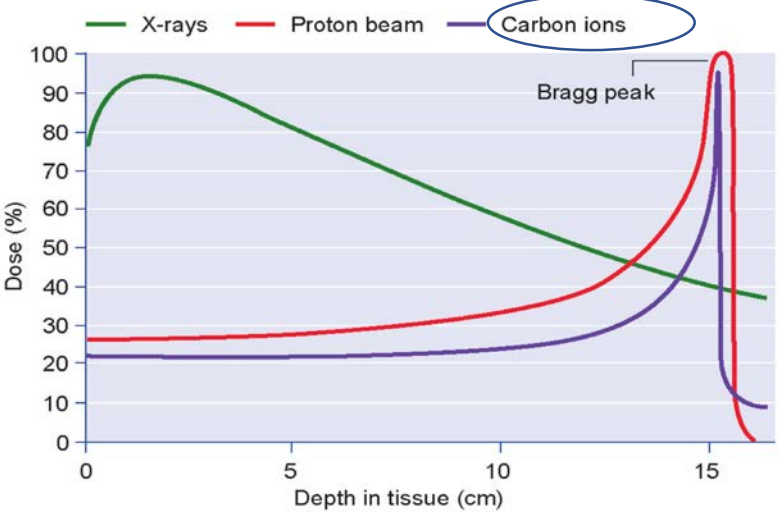
A. Gumberidze (D. Banaś, D. Sierpowski), et al., PRL 94, 223001 (2005)
Research Highlights, Nature 435, 858-859 (16 June 2005)

Terapia nowotworowa przy użyciu jonów

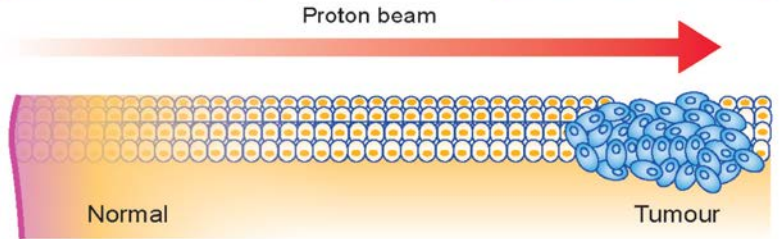


BIO/BIOMAT
space travel
..cosmic radiation
risk and shielding
particle therapy
radioactive beams
FLASH therapy

- Duża skuteczność hadronowej terapii nowotworowej GSI było poligonem doświadczalnym (1980-90) dla centrum terapii w Heidelbergu HIT (od 1993)



| | |
|---|--|
| High-energy Low dose Low-LET Fractionation sparing RBE ~1 OER ~3 | Low-energy High dose High-LET Little fractionation effect RBE >1 OER <3 |
|---|--|



Durante, Br. J. Cancer 2019

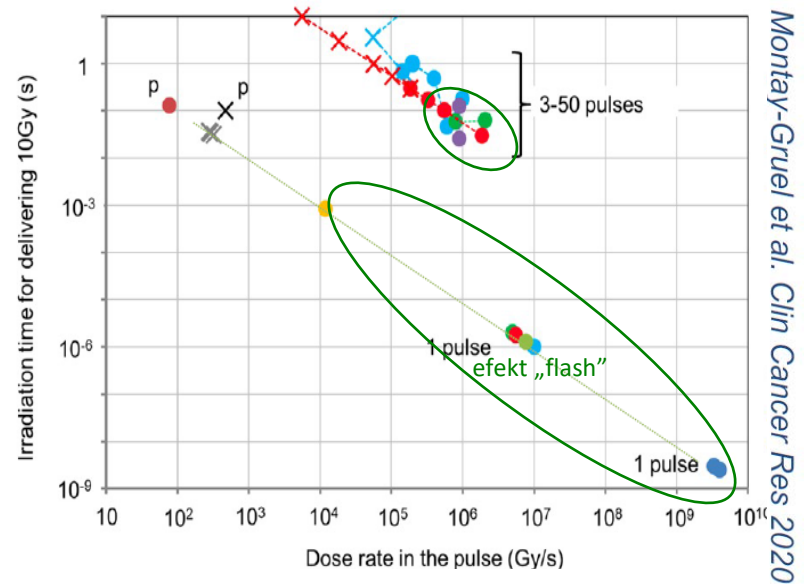
Jak można zwiększyć jej skuteczność?

Terapia typu FLASH

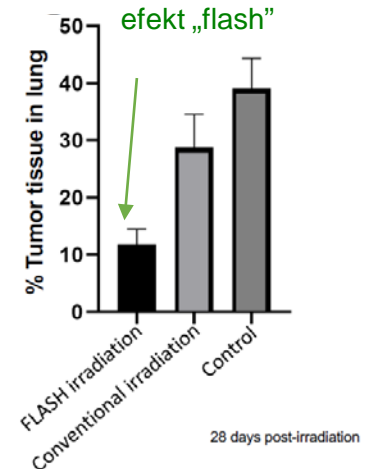
Durante et al., Radiother. Oncol., submitted

- oceniana jako najbardziej obiecujące odkrycie w radio-onkologii
- oznacza dostarczenie dużej dawki w bardzo krótkim czasie. Poprawa skuteczność terapii

Conditions to obtain or miss the FLASH effect



Montay-Gruel et al. Clin Cancer Res 2020



- Terapia wiązkami radioaktywnymi np. ^{11}C , ^{15}O dużych intensywnościach ($\sim 10^7$ p/s)
- Lepsza precyzja zasięgu (< 0.5 mm)
- Lepsza korelacja dawki i aktywności- online PET

NUSTAR (Nuclear Structure Astrophysics and Reactions)

- **Super FRS**

Wiązki radiaktywne: produkcja i identyfikacja rzadkich izotopów

- **HISPEC/DESPEC:**

High resolution in-flight gamma spectr. (HISPEC) and DEcay SPECTroscopy

- **R³B**

Reactions with Relativistic Radioactive Beams

- **SHE:** Super-Heavy Element Research

- **ILIMA:** Isomeric beams, Lifetimes and Masses at rel. energies in storage rings

eksperymenty w których biorą udział polscy fizycy

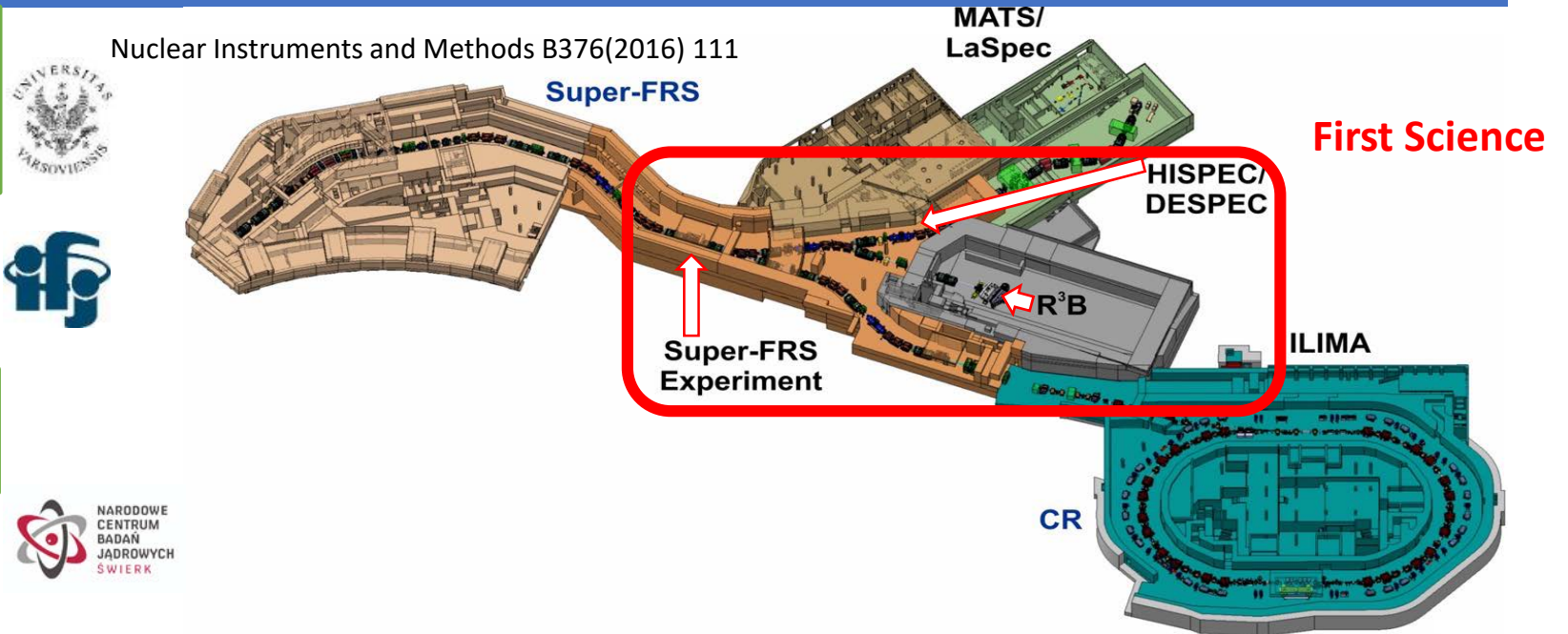
LaSpec: Laser Spectroscopy

- **ELISe** Electron-Ion Scattering in a Storage Ring

- **MATS** Precision Measurements of very short-lived nuclei using an Advanced Trapping System

- **EXL** Exotic nuclei studied in light-ion induced reactions at the storage ring

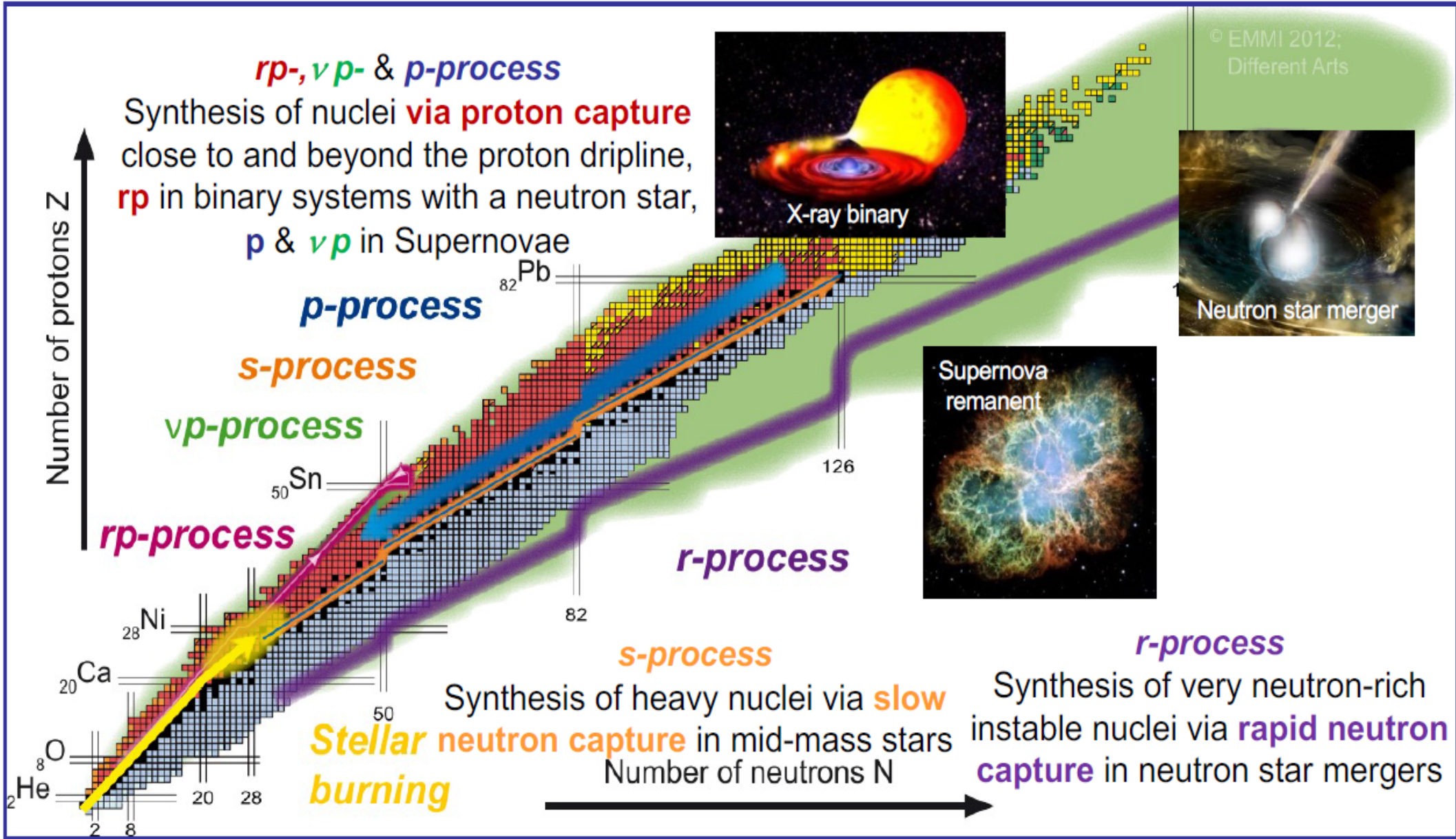
Około 660 naukowców z 32 krajów



Obszary badań

- Granice istnienia jąder (czasy życia, rozpady), poszukiwanie nowych izotopów
- Własności stanów podstawowych (masy, promienie jąder, deformacje)
- Struktura stanów wzbudzonych (poziomy energetyczne, rodzaje rozpadów)
- stany egzotyczne – hiperjądra, halo neutronowe, ..
- reakcje syntezy ciężkich elementów i ich pochodzenie we wszechświecie (procesy w astrofizyce) oraz jąder superciężkich
- równanie stanu materii jądrowej w asymetrycznych (N/Z) systemach

NUSTAR Pochodzenie elementów we wszechświecie



W. Korten „FAIR Seminar” UJ`2021

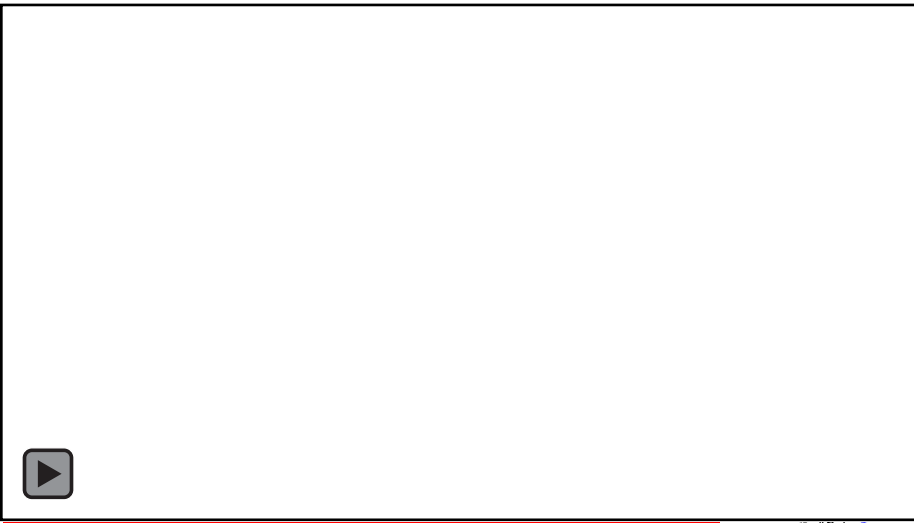
Super Fragment Separator (SFRS)-produkcja izotopów

- Kołem zamachowym NUSTAR jest separator mas Super FRS **Radioactive Ion Beam facility**

Wiązka pierwotna

SIS100- intensywne ($3-5 \cdot 10^{11}$!) wiązki ciężkich jonów o energii 1-2 GeV/u

Najbardziej energetyczna i intensywna RIB na świecie



SUPER-FRS: tarcza produkcyjna + separacja monoizotopowej wiązki wtórnej oparta na kombinacji dwóch metod:

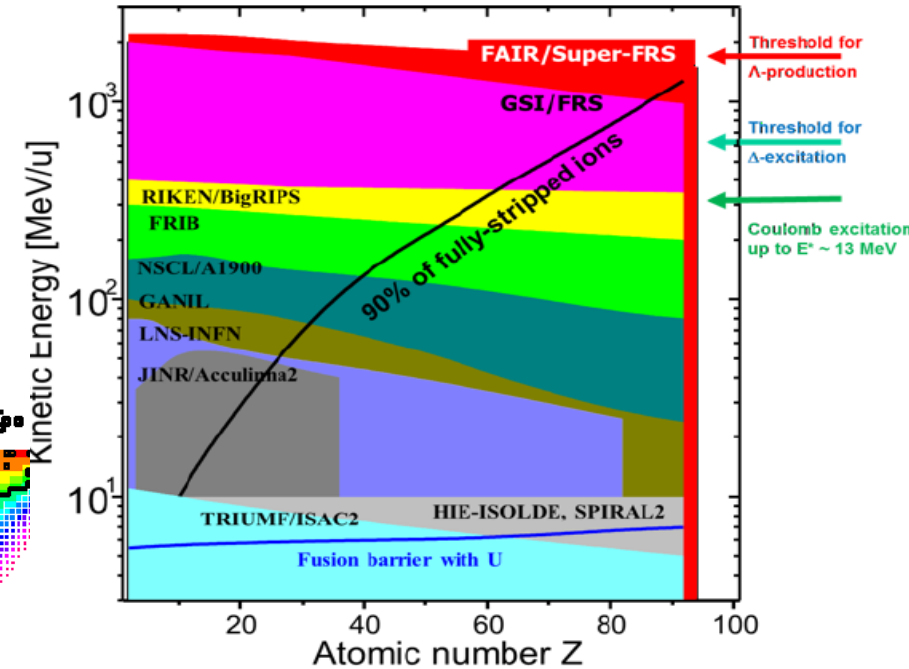
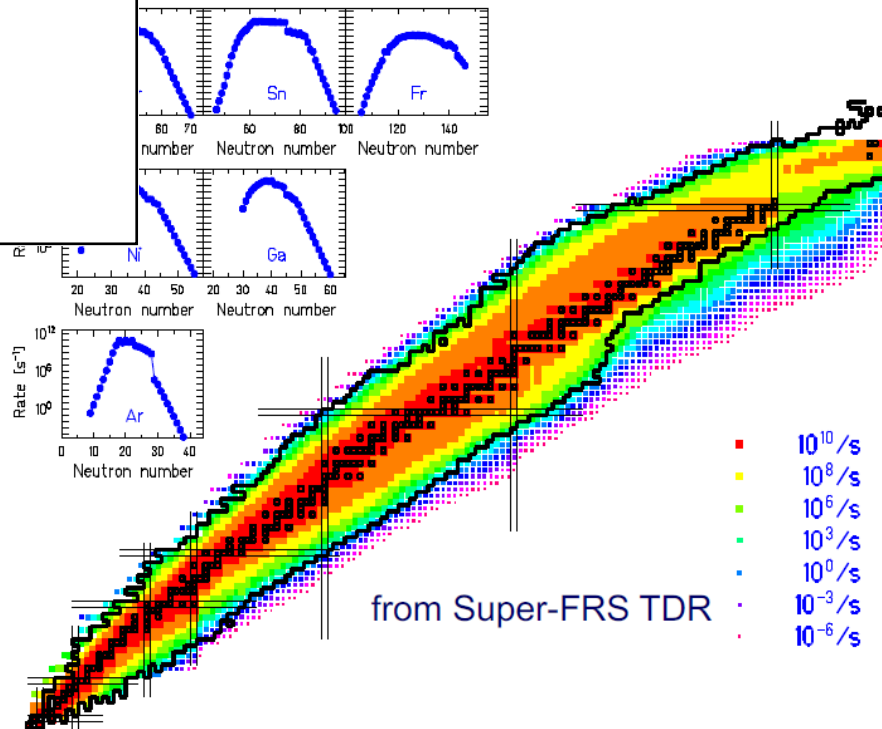
1. Separacja magnetyczna

$$B\rho \propto \beta\gamma A/Z$$

2. Straty energii

$$\Delta E \propto Z^2 f(\beta)$$

Projekcje intensywności RIB



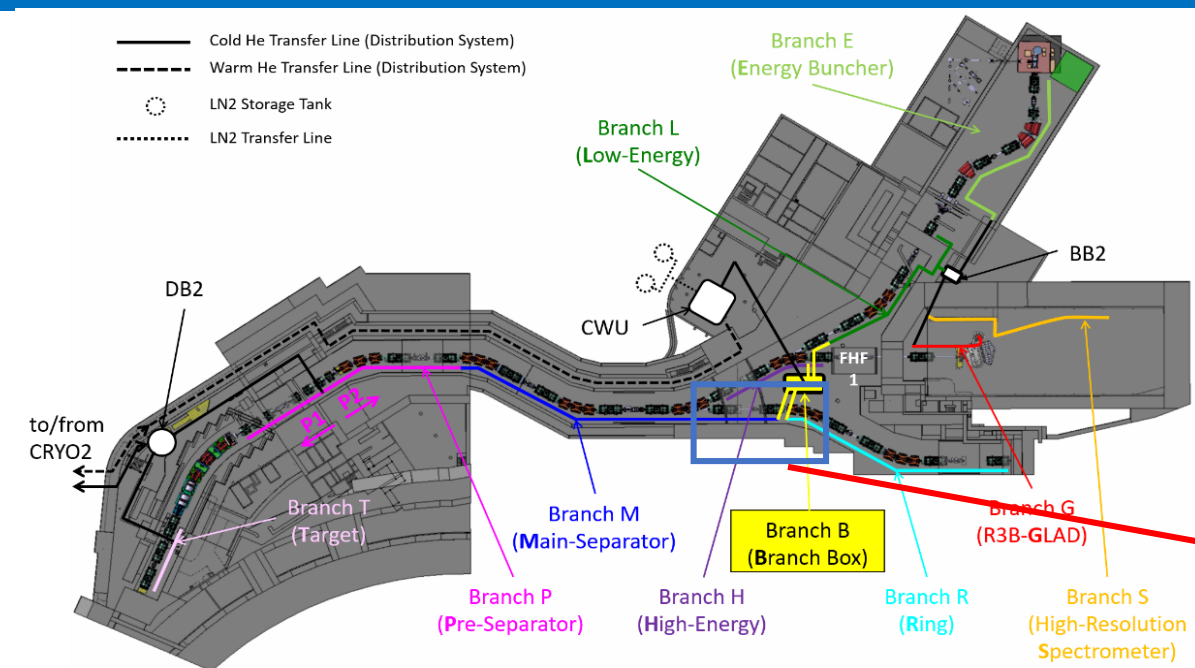
Wzrost o ~ 3 rzędy wielkości względem FRS

- ✓ wzrost intensywność wiązki
 - ✓ wzrost transmisji SFRS
- Wiązki radioaktywne dla $Z > 70$
krótkożyciowe izotopy (ns- μ s)

Polski wkład rzeczowy w SFRS



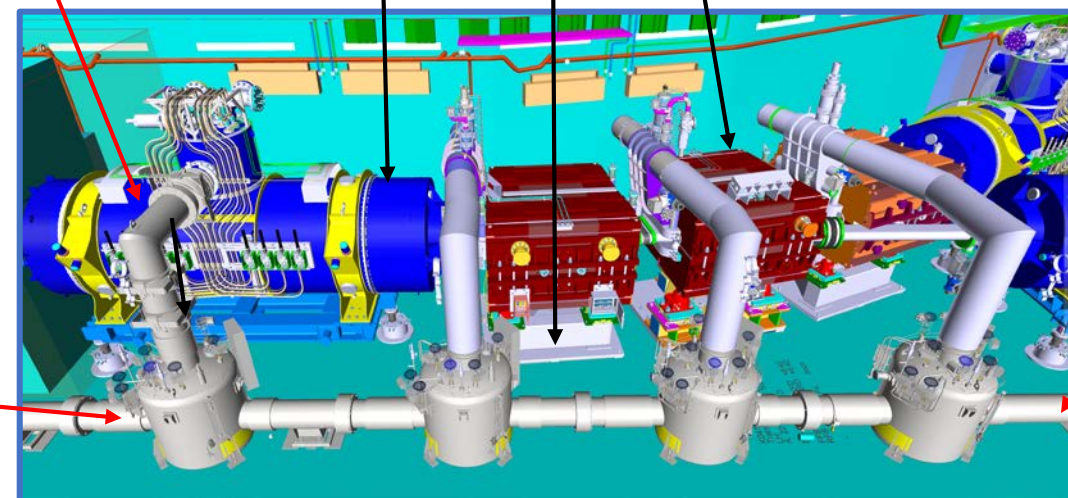
Politechnika
Wroclawska



Multiplet Magnet Cryostat

Dipole Magnet Cryostat

Jumper Connection

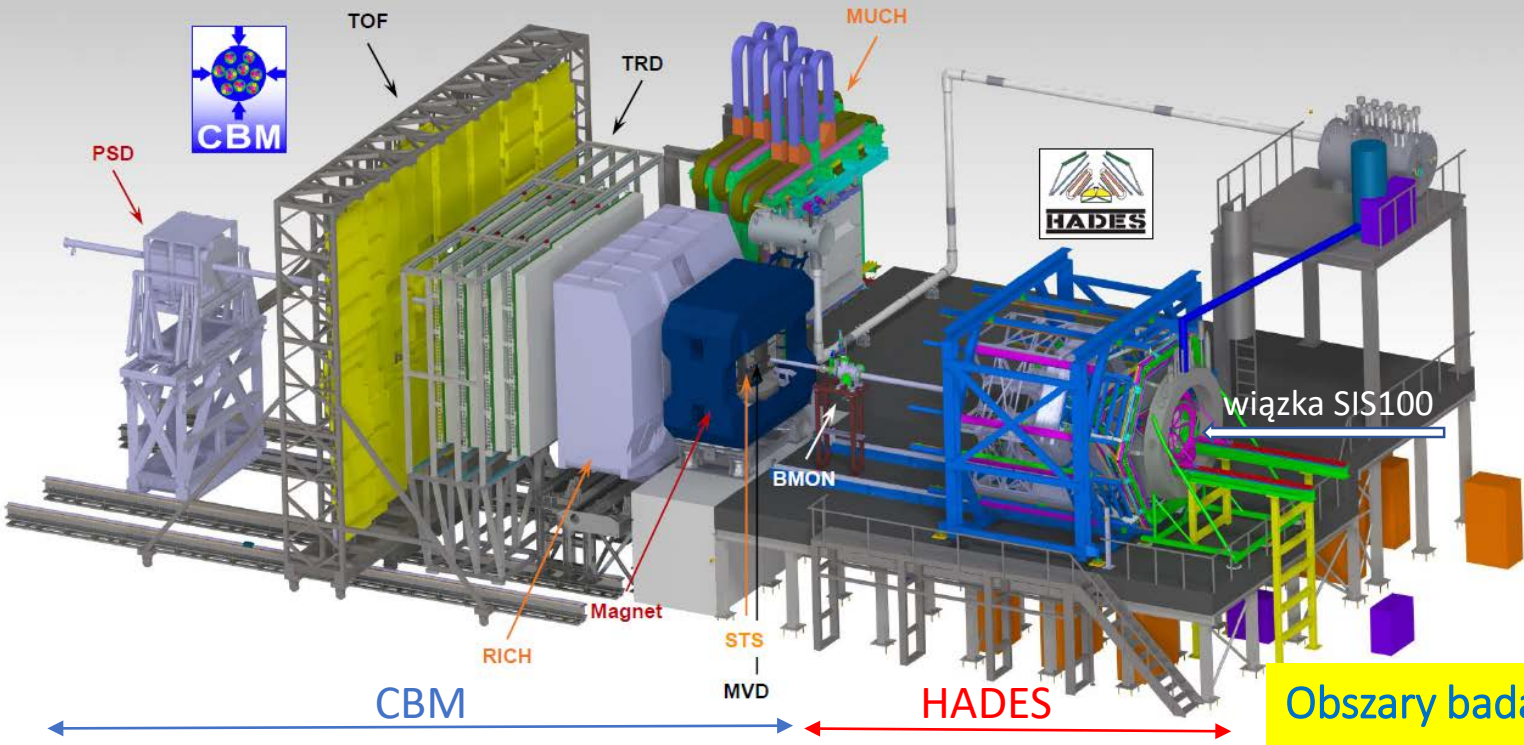


Feed Box

Politechnika Wroclawska : Projekt oraz wykonanie systemu kriogenicznego (8 gałęzi-branches, kilkaset elementów) dla magnesów SFR. Branch-T w fazie produkcji

Bardzo skomplikowany projekt ze względu na skalę, różnorodność oraz duże upakowanie elementów wkład kluczowy dla First Science

C.B.M (Compressed Baryonic Matter)



Eur.Phys.J.A 53 (2017) 3, 60

CBM

400 naukowców z 11 krajów

HADES

120 naukowców z 7 krajów

Udział polskich grup badawczych



Politechnika
Warszawska



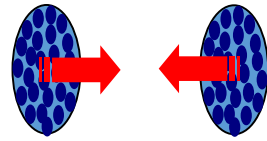
Obszary badań

- Badanie własności oddziaływań silnych (QCD) w nieperturbacyjnym obszarze w reakcjach relatywistycznych ciężkich jonów → **diagram fazowy silnie oddziałującej materii w obszarze dużych gęstości barionowych** $\sqrt{s_{NN}} = 2 - 5 \text{ GeV}/u$
- komplementarny do badań na Large Hadron Collider (LHC) i Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)
- **EOS materii jądrowej**: istotny dla zrozumienia własności gwiazd neutronowych,

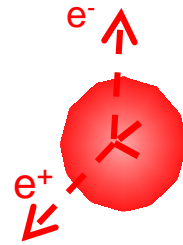
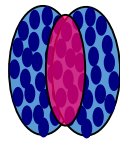
- dwa detektory na tarczach stacjonarnych o komplementarnych akceptancjach geometrycznych: CBM ($2^\circ < \theta < 25^\circ$), HADES ($18^\circ < \theta < 80^\circ$)
- wiązki z SIS100 protonów (do 30 GeV/u) i ciężkich jonów (do 11 GeV/u)
- pomiary przy bardzo dużej częstotliwości interakcji do 5 MHz (x 100 RHIC)
- Czułość na detekcje rzadkich sygnałów : par pozyton-elektron, produkcji powabu (cząstek z kwarkami powabnymi)
- Struktura hadronów w reakcjach pp/pA – dyskusja nad wspólnym programem z PANDA

Diagram fazowy QCD z eksperymentów URHIC

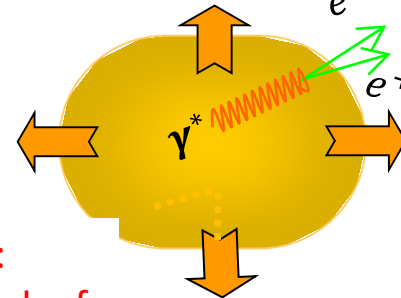
„model standardowy”
URHIC



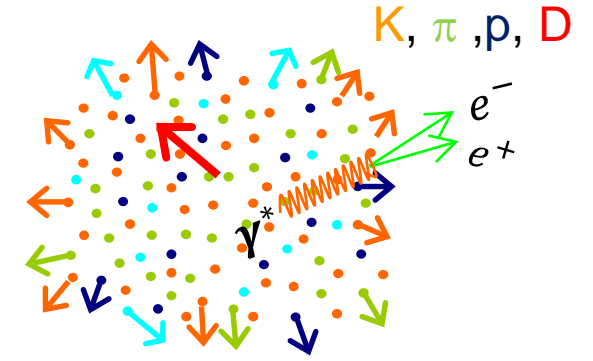
NN-coll.
termalizacja



Wczesna faza:
gęsta materia d.o.f
kwarki, gluony

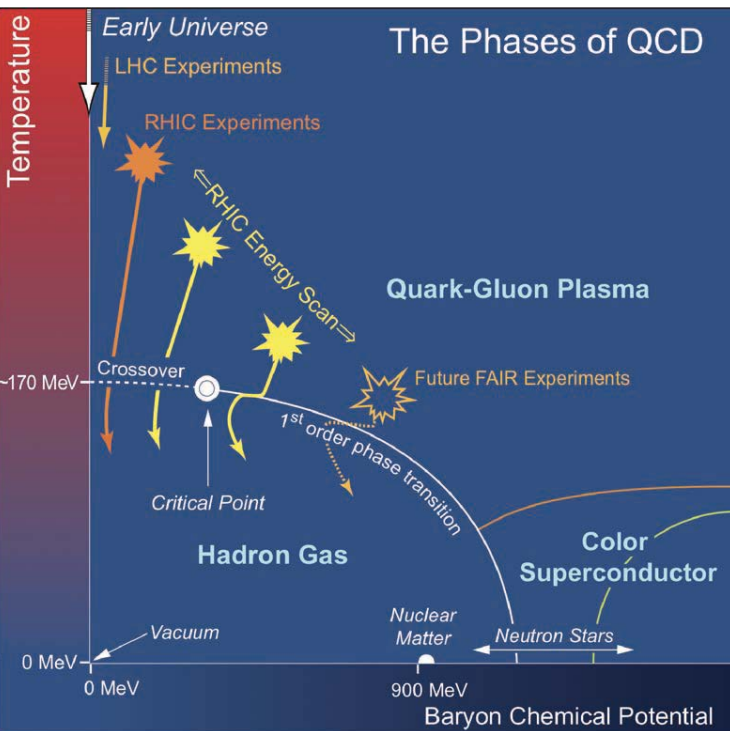


Gaz Hadronów



„Freeze-Out”

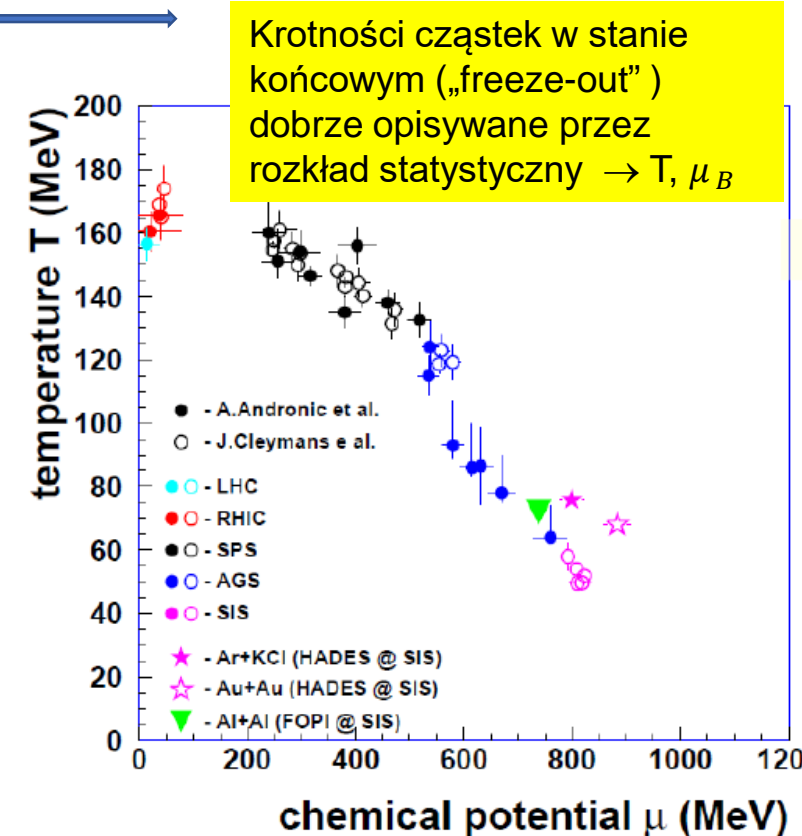
Czas ($T \sim 10-20$ fm/c)



Przyjscia fazowe (QGP ← gaz hadronowy),
własności QGP punkt krytyczny ?

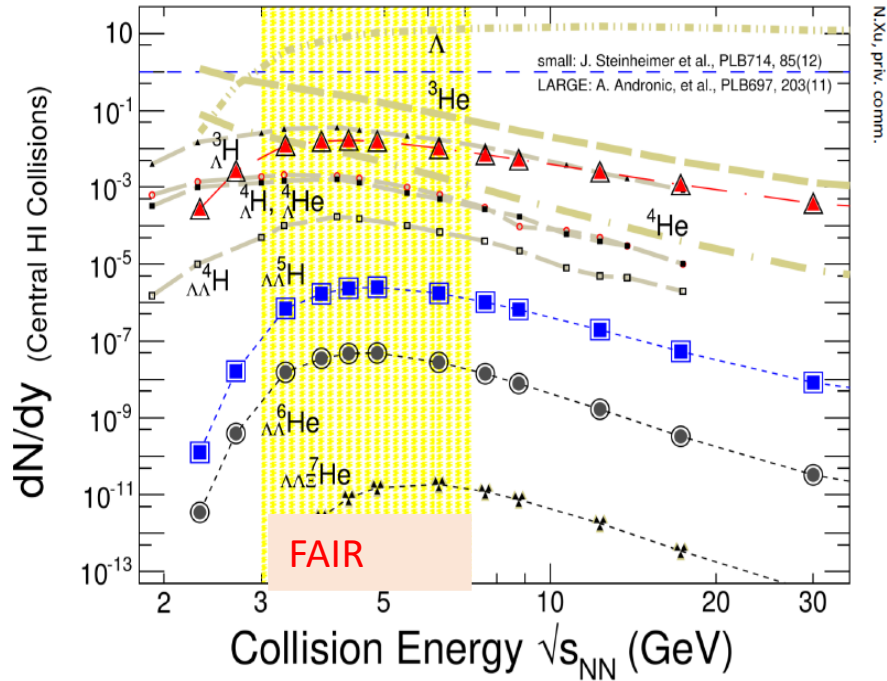
Observable:

- ✓ Fluktuacje liczby barionów poprzez pomiar momentów rozkładów krotności barionów (punkt krytyczny)
- ✓ Krotności produkcji hadronów dziwnych ($S=2,3$) oraz powabnych w pobliżu progu
- ✓ Rozkłady asymetrii emisji hadronów (pływ) wzg. Płaszczyzny reakcji
- ✓ Widma promieniowania EM : fotonów rzeczywistych i wirtualnych (masowych – pary dileptonowe)



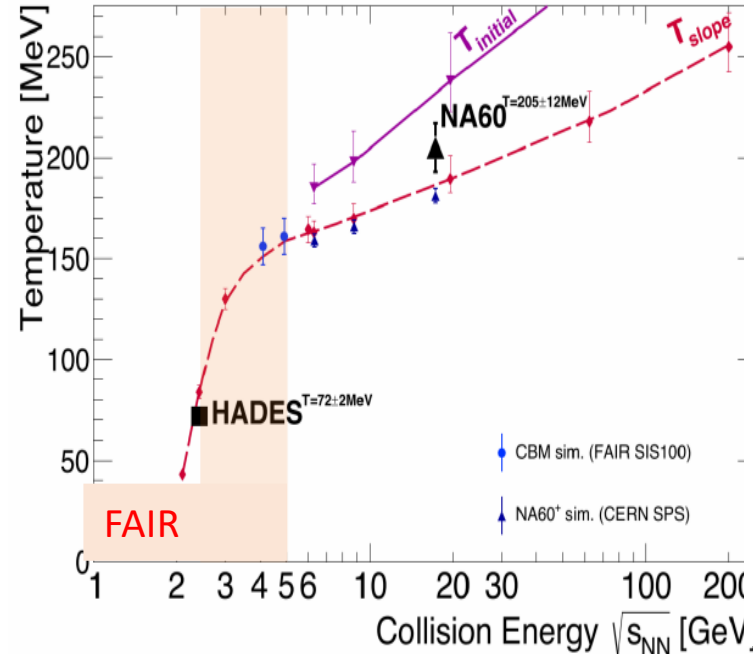
Przykłady istotnych pomiarów dla C.B.M

Produkcja hiperjader



- ✓ Duże krotności dla FAIR
- Mechanizm produkcji czuła na własności materii (równanie stanu) i propagacji kwarków dziwnych

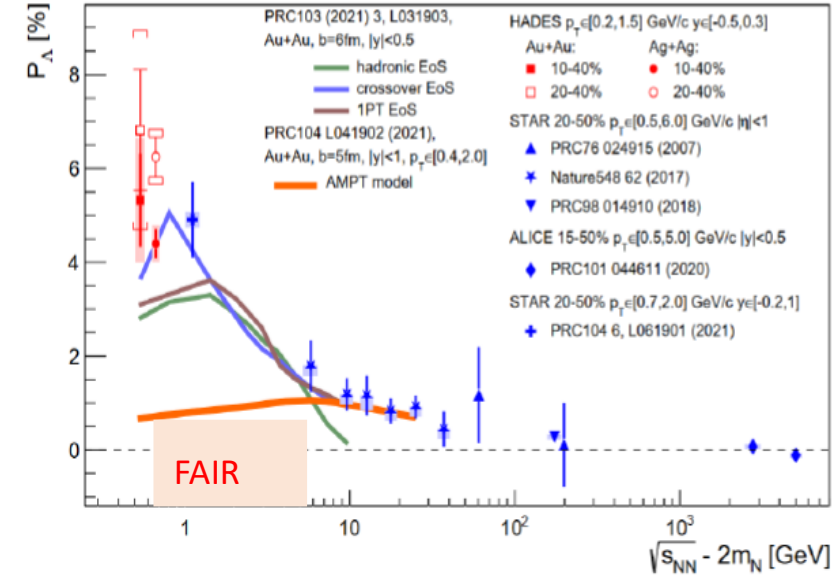
Pomiar temperatury wczesnej fazy



- Pomiar T z widm promieniowania EM (dileptony) – tylko 2 pomiary HADES/NA60
- „Krzywa kaloryczna” – sygnatura przejścia fazowego?

Polaryzacja Λ

HADES Phys.Lett. B 835 (2022) 137506, arXiv:2207.0516v

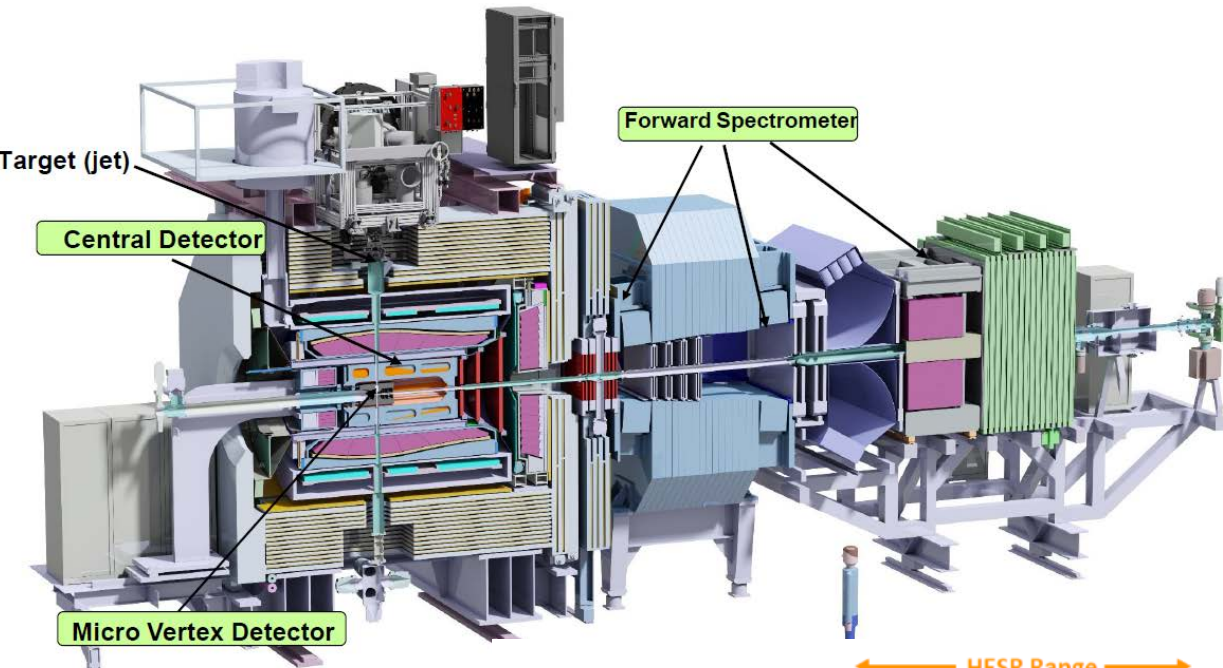


- Polaryzacji hiperonów Λ, Ξ
- Czuła na własności Sprężenie krętu w reakcji do polaryzacji (spinu)

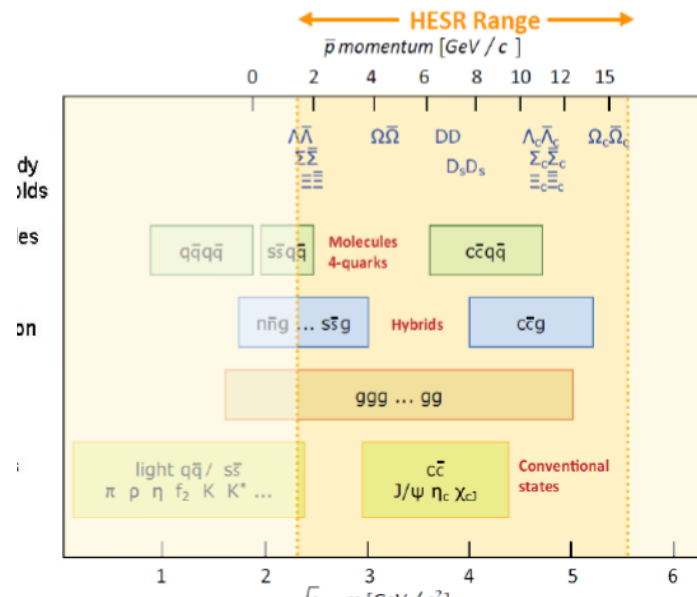
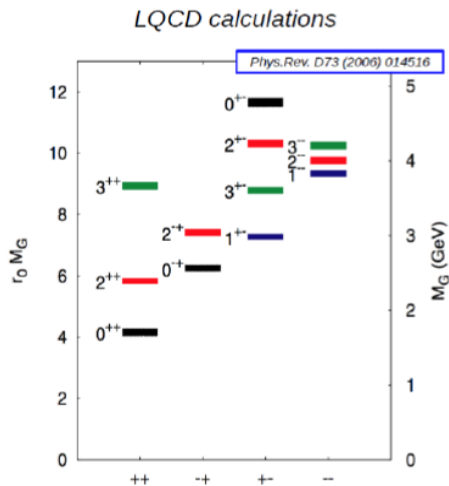
Proton ANnihilation in Darmstadt (PANDA)

Program badawczy
arXiv:0903.3905v1

PANDA
450 naukowców z 19 krajów



Glueball mass spectrum



Obszary badań

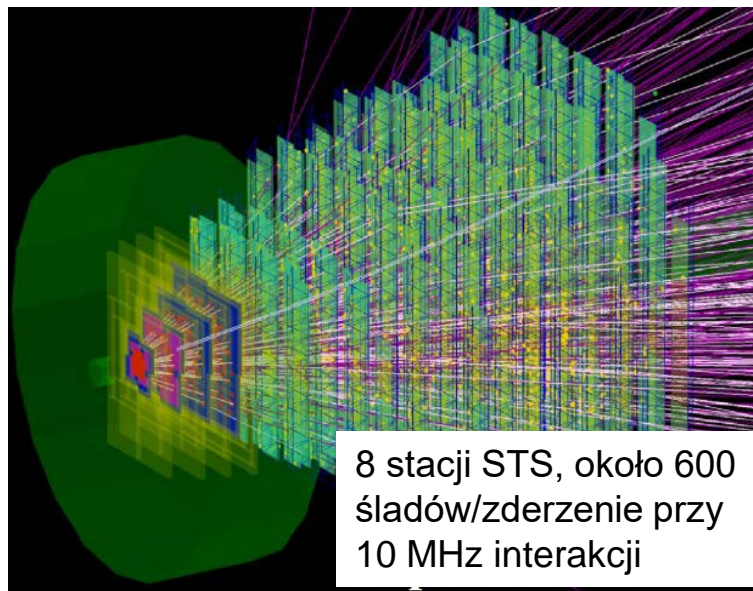
- Badanie struktury hadronów, w szczególności z zawartością kwarków dziwnych i powabnych, w reakcjach anihilacji proton-antyproton
- Poszukiwanie stanów egzotycznych (poza modelem kwarkowym) . w anihilacji $\bar{p}p$ formacja wszystkich stanów kwantowych jest dozwolona w e^+e^- tylko $J^{PC} = 1^{--}$
- precyzyjny skan kształtów linii rezonansów (zdolność definiowana przez zdolność rozdzielczą HESR $\Delta E \approx 5$ keV)
- Struktura protonu: rozkład ładunku, gluonów, zawartość ciężkiego zapachu (powab)

Program badawczy przy użyciu wiązek protonów dostępnych w I fazie **FirstScience+** diskutowany wraz z CBM

Polskie wkłady rzeczowe w eksperymentach CBM/PANDA

- ✓ Kluczowe dla obu eksperymentów realizacje sensorów z systemami odczytu, procesowania danych przy użyciu wysoko zintegrowanej i programowalnej elektroniki (ASIC, FPGA, heterogeniczne platformy obliczeniowe oparte GPU, FPGA)

CBM : krzemowy detektor rekonstrukcji śladów (STS)
Okolo 1.8 mln sensorów (granulacja $50\mu\text{m}$), 16 000 układów ASIC "STS-XYTER", odporność na radiację



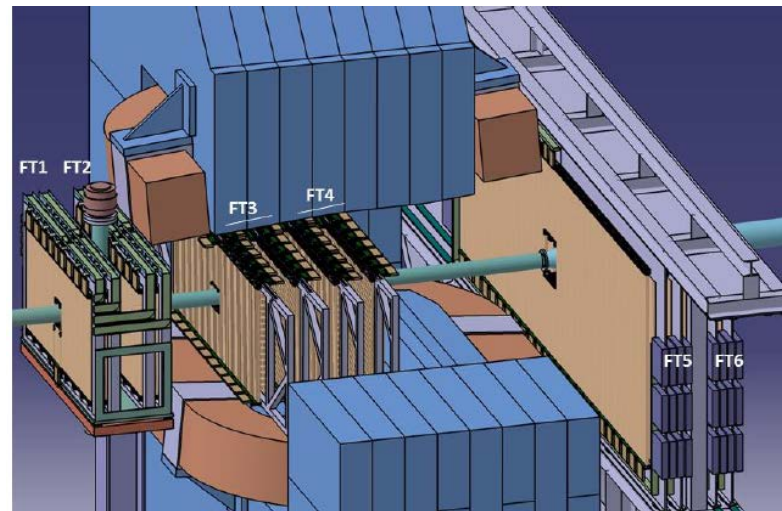
Oprogramowanie FPGA płyt odczytu (800) i procesowania danych (4.8 Gb/s/link)



Politechnika
Warszawska



PANDA : detektor słomkowy (Forward Detector) z odczytem
Okolo 12 200 słomek, $200\mu\text{m}$ zdolność rozdzielcza, 1600 układów ASIC „PASTTREC”, pomiar czasu dryfu w FPGA z precyzją 40ps



6 stacji FT, do 1.2 MHz/słomkę, odczyt płyt 1 Gb/s/link



System kontroli tarczy protonowej (proton cluster jet target)



Podsumowanie

- FAIR jest unikalnym w skali światowej projektem otwierającym nowe możliwości badań w fizyce atomowej, jądrowej, materiałowej oraz ich aplikacji
- Projekt znajduje się w kluczowej fazie realizacji z pierwszym etapem First Science obejmującym budowę nowego akceleratora SIS100, separator mas (SFRS) z terminem realizacji 2028 rok. Wraz z infrastrukturą badawczą Compressed Baryonic Matter (First Science+) umożliwi badania wszystkich filarów FAIR (z wyjątkiem fizyki antyprotonów w eksperymencie PANDA)
- Polskie wkłady rzeczowe mają zasadnicze znaczenie dla realizacji tej konfiguracji
- Polskie grupy badawcze są aktywne w większości filarów badawczych FAIR. Wyzwaniem jest utrzymanie ich potencjału oraz dalsze rozszerzenia adekwatne do możliwości badawczych FAIR.

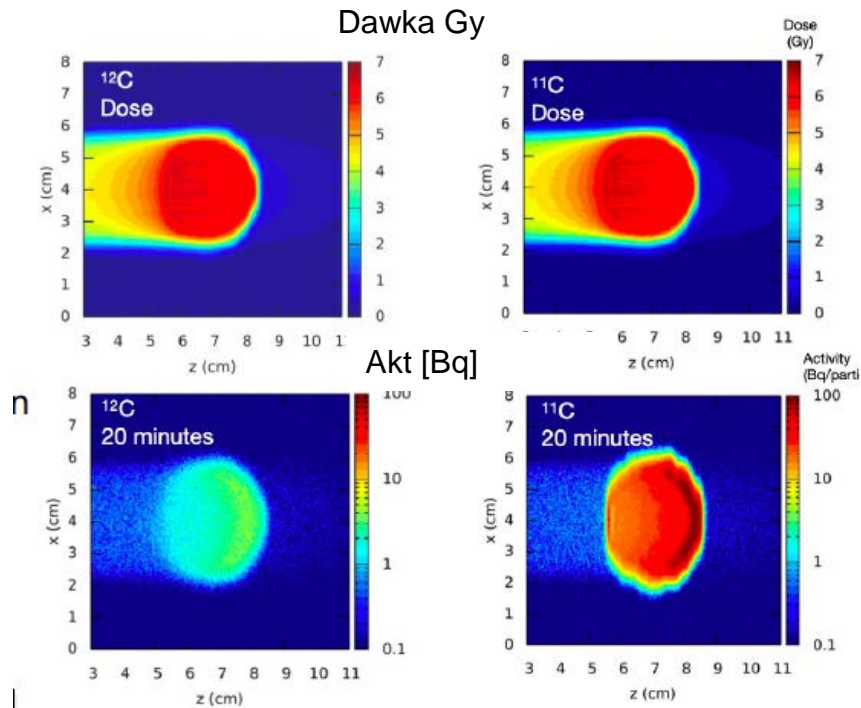
Serdecznie zapraszamy do udziału !!!

<https://fair.uj.edu.pl/>

Back-up

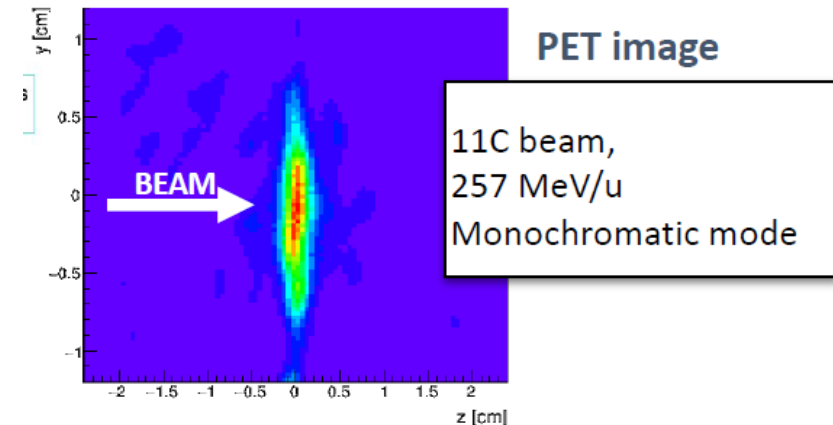
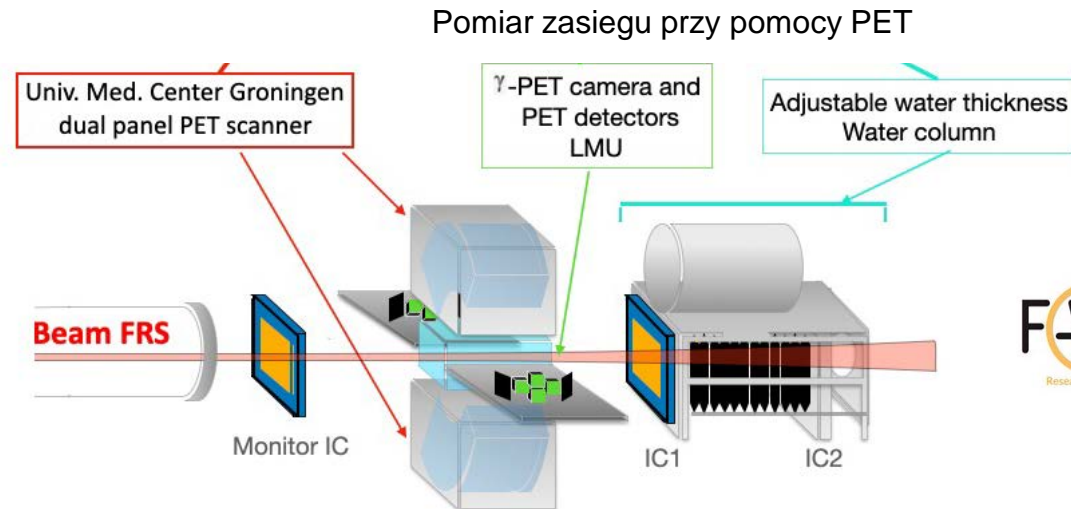
Terapia przy pomocy RIB?

- W FAIR produkowane będą wiązki radioaktywne (np. ^{11}C , ^{15}O) dużych intensywnościach ($\sim 10^7$ p/s)
- W połączeniu z techniką PET umożliwi na znacznie lepszą kontrolę zasięgu (< 0.5 mm w porównaniu do kilku mm)
→ poprawa korelacji dawki i aktywności

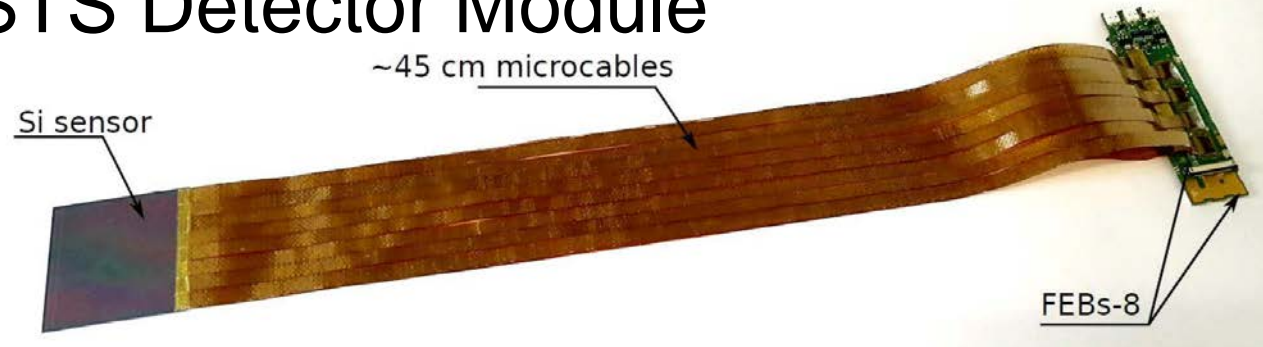


Boscolo *et al.*, *Front. Oncol.* 2021

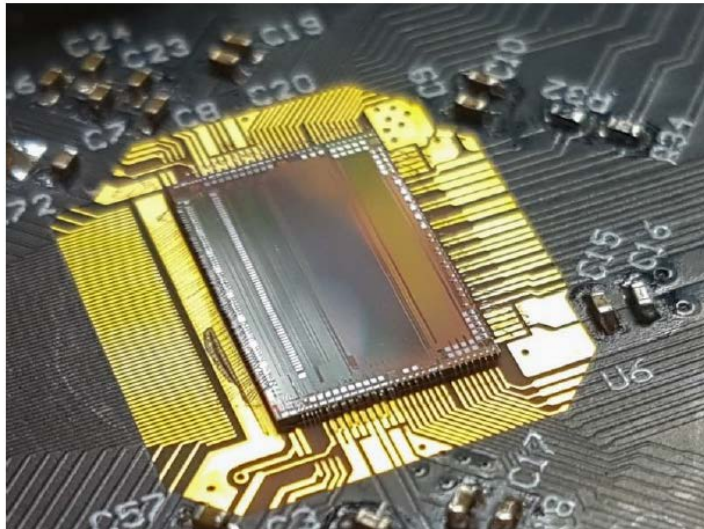
www.gsi.de/BARB



STS Detector Module



Układ scalony SMX2.2 typu ASIC stworzony i testowany na AGH



Właściwości:

- Układ samo-trygerujący o niskiej poborze mocy
- 128 kanałów + 2 kanały testowe
- Rozdzielczość czasowa ~ 5 ns
- Dostarcza skonwertowane do postaci cyfrowej hity o 5-cio bitowej informacji spektroskopowej i 14-sto bitowej informacji czasowej
- Zakres liniowości do 15 fC
- Wysoka odporność na radiację

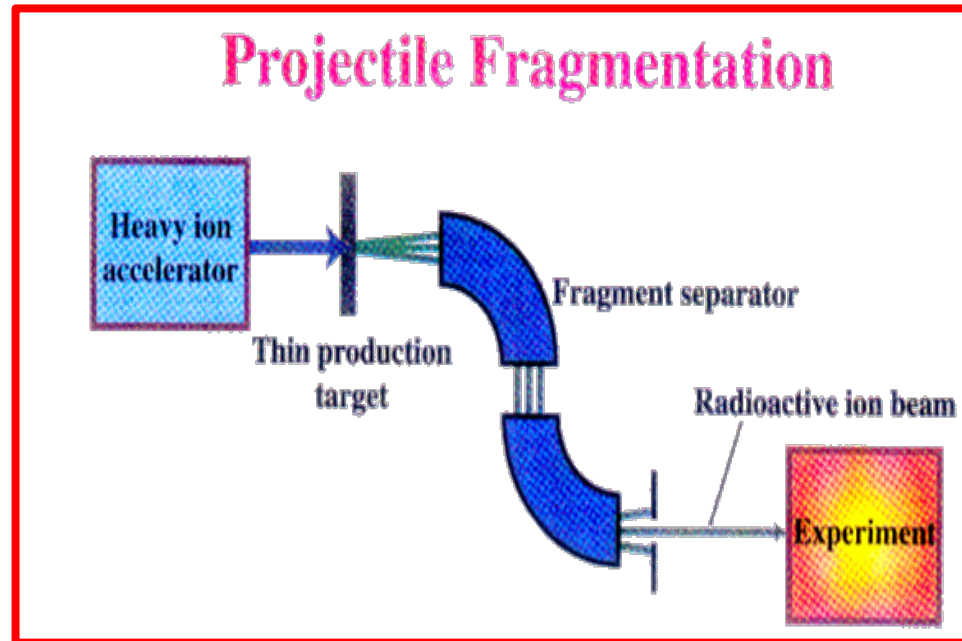
Budżet: ~600 000 EUR

Status: ostatni etap testów: 90% układów zostało przetestowanych



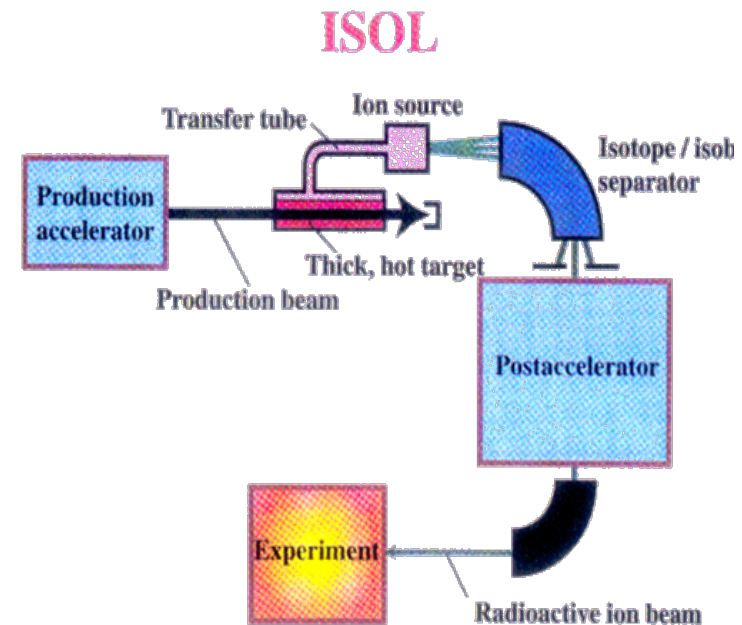
| Parameter | Value |
|---|---|
| Process | 180 nm CMOS MM/RF |
| Chip area | 10.0 mm × 6.75 mm |
| Channel number | 128 + 2 test |
| ADC bits | 5 |
| Input charge frequency | max. 500 kHz |
| Power Consumption: Uninitialized Initialized | 0.6 – 1.2 W/chip 1.023 W/chip @ I _q =2 mA 8 mW/channel |
| Offset spread of fast channel | 1.12 mV rms / 0.015 fC rms (after correction) |
| Offset spread of ADC [fC] | 0.09 (before correction) [39] 0.02 (after correction) |
| Gain Fast shaper (STS) Slow shaper (STS) | 73 mV/fC 32.7 mV/fC |
| Gain spread: Fast shaper Slow shaper | 0.8 % 0.5 % (after calibration) |
| Slow shaper peaking time [ns] | 90 / 180 / 262 / 332 |
| Yield | >91% (146 ASICs tested on PCBs) |

Produkcja wiązek radioaktywnych jonów (RIB)



GANIL, GSI/FAIR, RIKEN, MSU/FRIB

- ❑ Wszystkie nuklidy ($T_{1/2}$: 100ns)
- ❑ Szybkie wiązki (100 MeV/u, 0.5 c)



GANIL, SPES-LNL, CERN, TRIUMF

- ❑ Długożyciowe izotopy ($T_{1/2}$: ms-s)
- ❑ Wiązki monochromatyczne o wysokiej intensywności