

課題名：二重魔法数エキゾチック核 ^{78}Ni の 質量精密測定

埼玉大、山口貴之
(代理：筑波大、小沢顕)

内容

- 課題研究の目的
- 稀少RIリング(Rare RI Ring)の紹介
- 稀少RIリングでの質量測定
- チェレンコフ検出器の開発
(チェレンコフ光による速度選別法の開発)
- まとめ

課題研究の目的

中性子星の理解には原子核の状態方程式(EOS)の決定が不可欠！

Energy per nucleon of nearly symmetric nuclear matter

$$w = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2}(n - n_0)^2 + \left[S_0 + \frac{L}{3n_0}(n - n_0) \right] \alpha^2$$

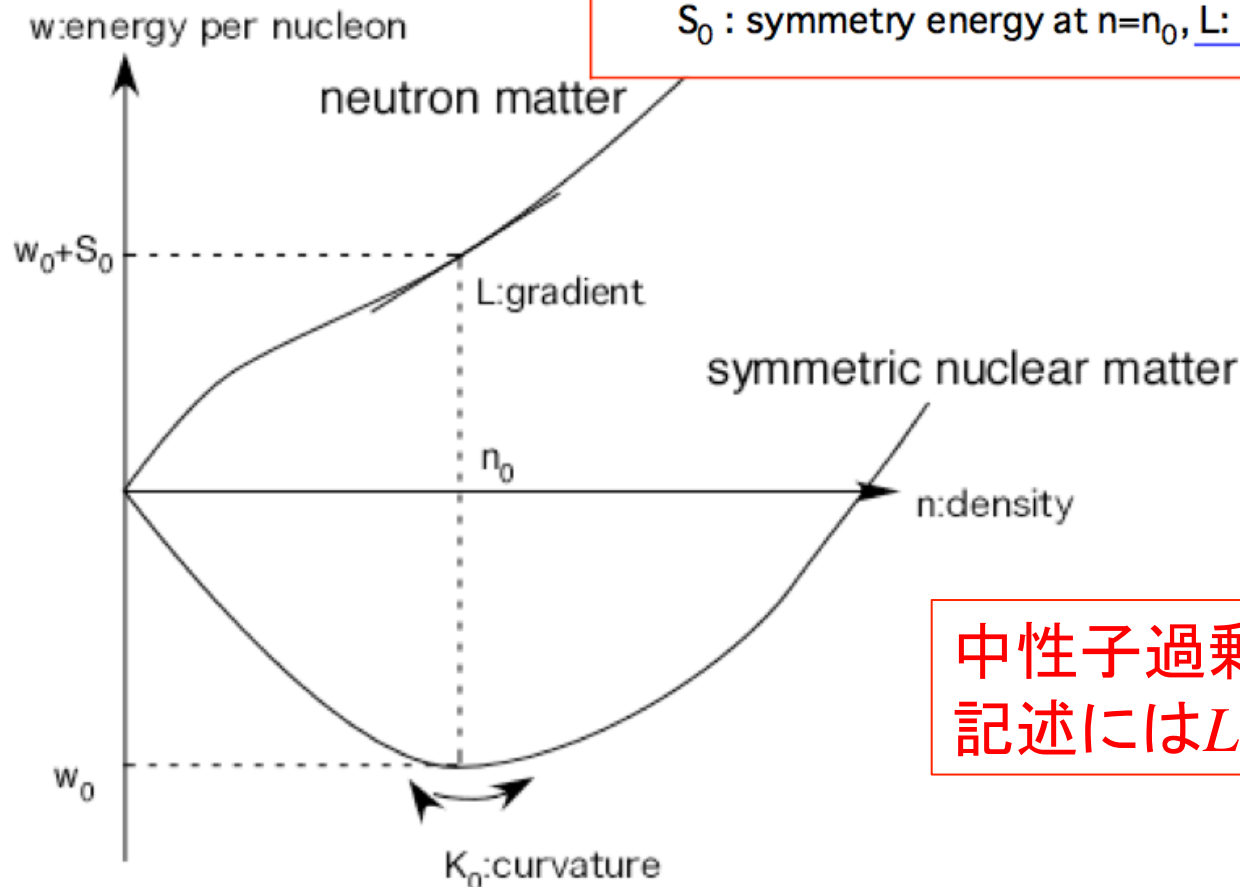
n_0 : nuclear density, w_0 : saturation energy, K_0 : incompressibility

S_0 : symmetry energy at $n=n_0$, L : its density derivative coefficient

α : neutron excess

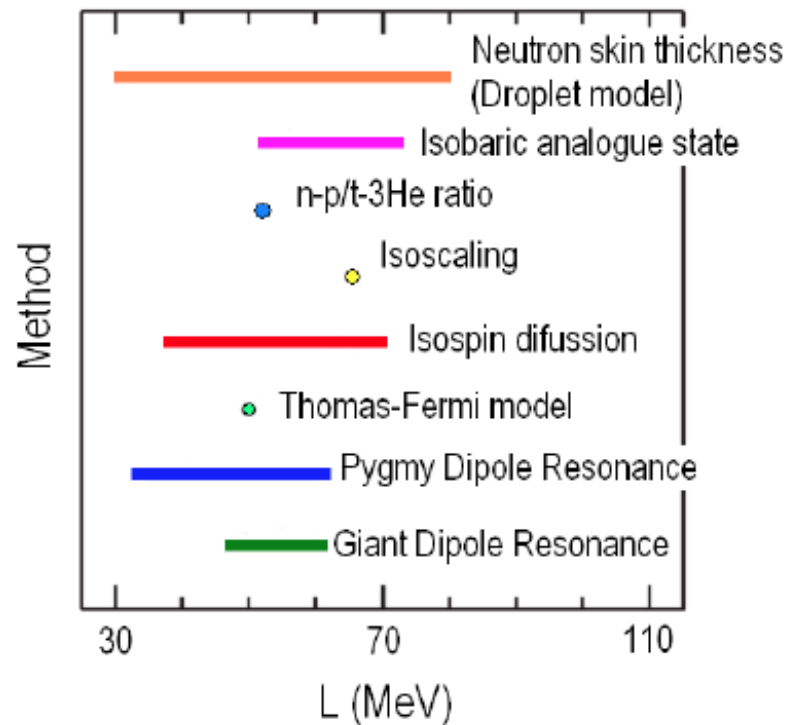
$$L = 3n_0 \left. \frac{dS(n)}{dn} \right|_{n=n_0}$$

$$S_0 = S(n_0)$$

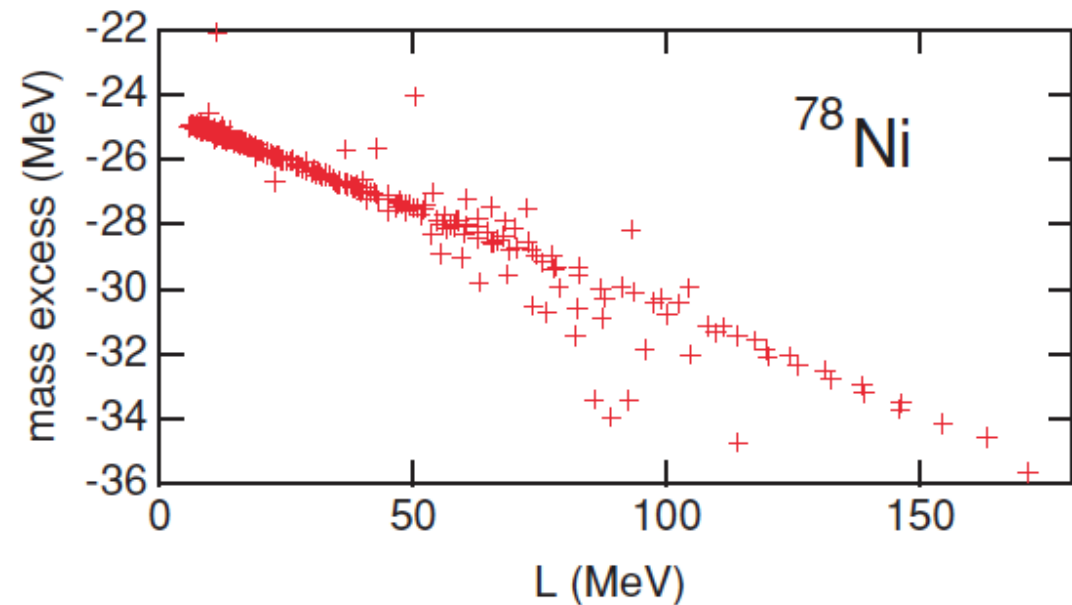


中性子過剰非対称核物質の記述には L の決定が重要！

$$w = w_0 + \frac{K_0}{18n_0^2}(n - n_0)^2 + \left[S_0 + \frac{L}{3n_0}(n - n_0) \right] \alpha^2$$



Pramana J. Phys. 75, 259 (2010)

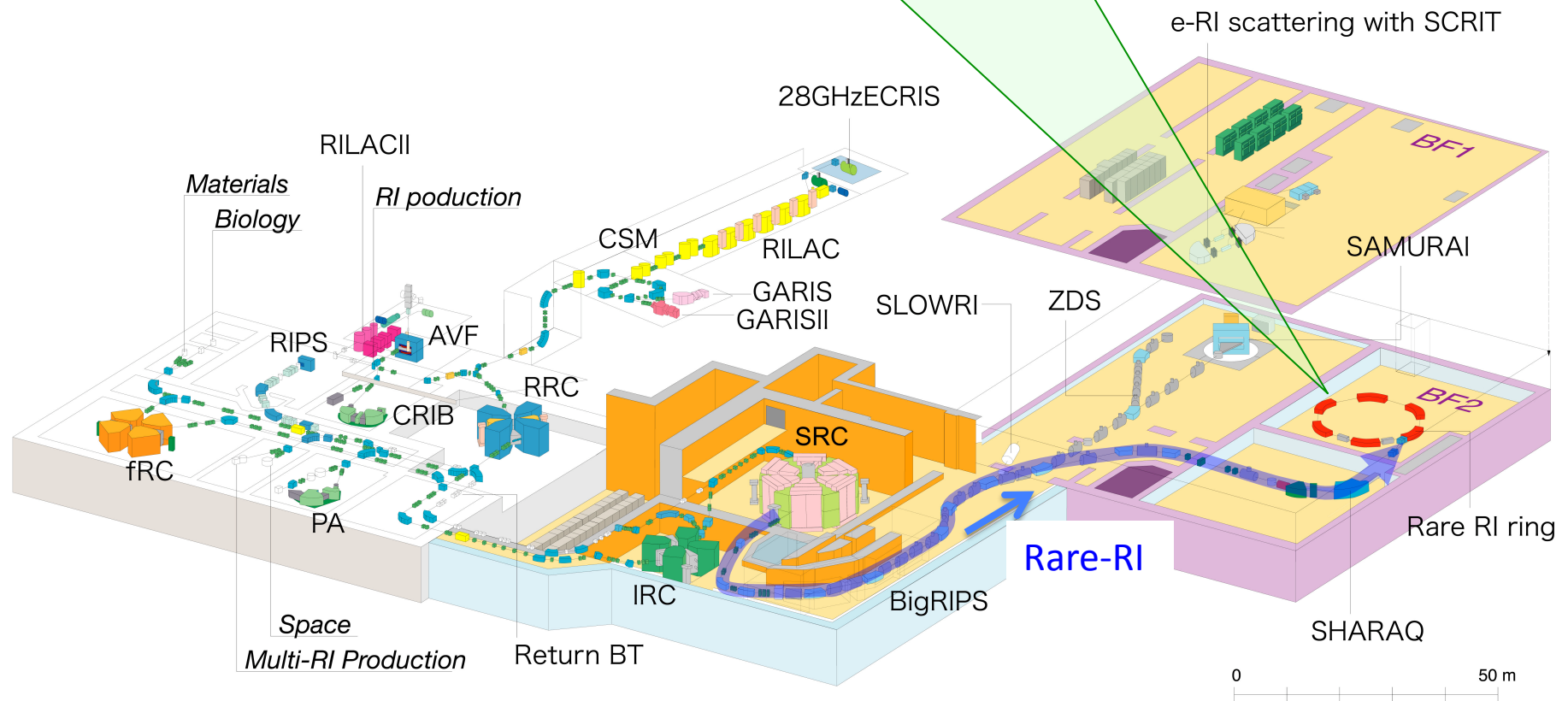


PRC81, 054302 (2010)

エキゾチック核(^{78}Ni)の質量を測定してEOSの L を決定したい。

RIビームファクトリー(RIBF)

稀少RIリング(Rare-RI Ring)



稀少RIリングの現状

March 2013



稀少Rリングでの質量測定

$$T_0 = \frac{1}{f_c} = 2\pi \frac{m}{qB} = 2\pi \frac{m_0}{q_0 B_0} \quad \text{Cyclotron frequency } f_c$$

PTEP2012, 03C009(2012)

Mass is determined relatively

For $m_1/q = m_0/q + \Delta(m_0/q)$

$$\frac{m_1}{q_1} = \left(\frac{m_0}{q_0} \right) \frac{T_1}{T_0} \frac{\gamma_0}{\gamma_1} = \left(\frac{m_0}{q_0} \right) \frac{T_1}{T_0} \sqrt{\frac{1 - \beta_1^2}{1 - \left(\frac{T_1}{T_0} \beta_1 \right)^2}}$$

$$\frac{\delta(m_1/q_1)}{m_1/q_1} = \frac{\delta(m_0/q_0)}{m_0/q_0} + \frac{\delta(T_1/T_0)}{T_1/T_0} + k \frac{\delta\beta_1}{\beta_1} \quad \longrightarrow \quad 10^{-6}$$

reference
 $< 10^{-6}$

measurement
 $< 10^{-6}$

measurement
 $\sim 10^{-4}$

$$k = -\frac{\beta_1^2}{1 - \beta_1^2} + \left(\frac{T_1}{T_0} \right)^2 \frac{\beta_1^2}{1 - (T_1/T_0)^2 \beta_1^2}$$

$k \sim 10^{-2}$

difference of T $\sim 1\%$
(difference of $m/q \sim 1\%$)

Only 1 particle (200 A MeV) is stored.

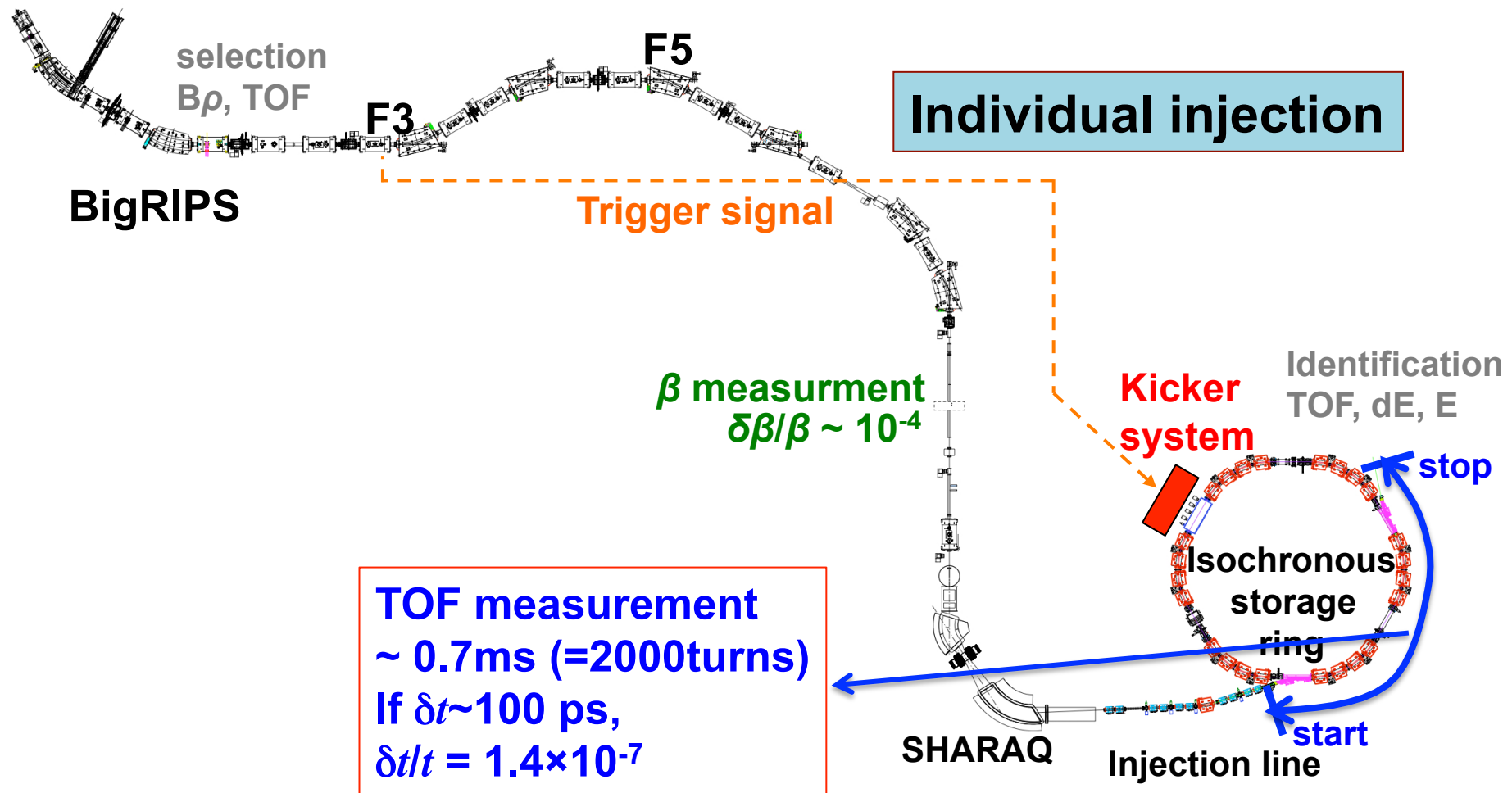
Isochronous mass spectrometry

- Cyclotron-like storage ring
- Individual injection

→ Short measurement time (<1 ms)

→ Good isochronous field ($\sim 10^{-6}$)

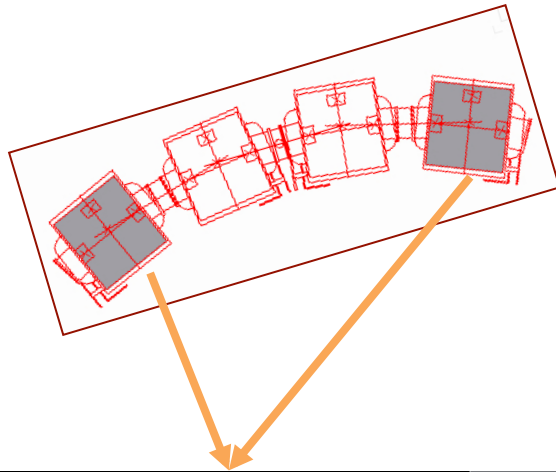
→ High efficiency ($\sim 100\%$)



蓄積リングの基本仕様

蓄積リングは等時性リングであり、サイクロトン型蓄積リングである。

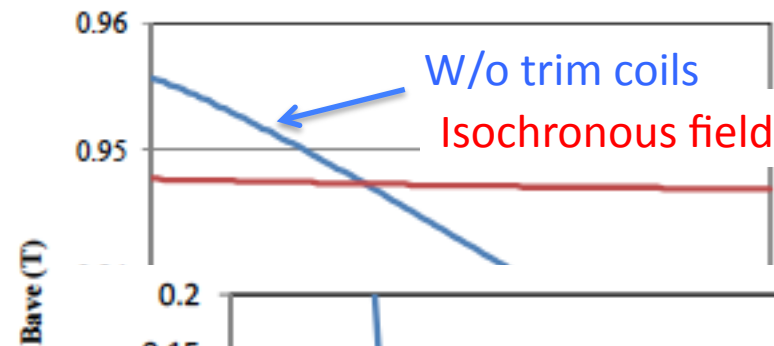
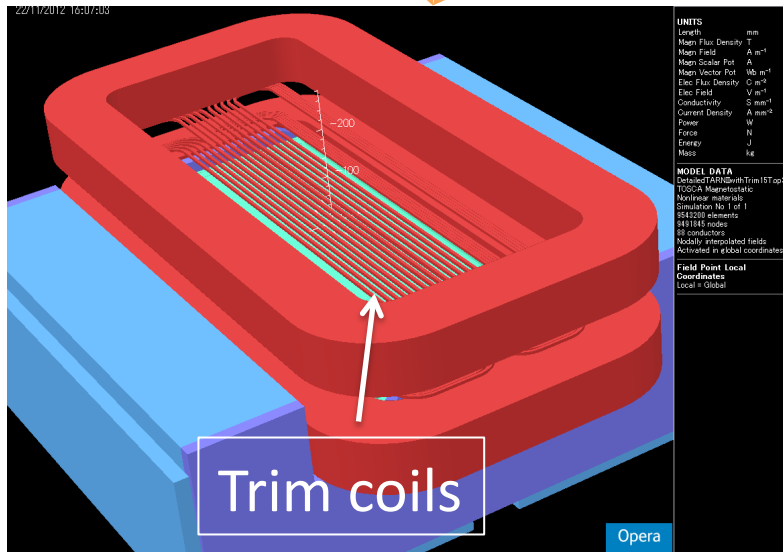
- **Beam energy :** 200 A MeV
- **Lorentz factor γ :** 1.2147
- **Circumference :** 60.3507 m
- **Momentum acceptance :** $\sim \pm 0.5 \%$
- **Revolution frequency :** 2.82 MHz
- **Revolution time :** 355 ns
- **Betatron tune :** $Q_x = 1.25$, $Q_y = 0.84$
- **Dispersion of straight part :** 66.9 mm/%



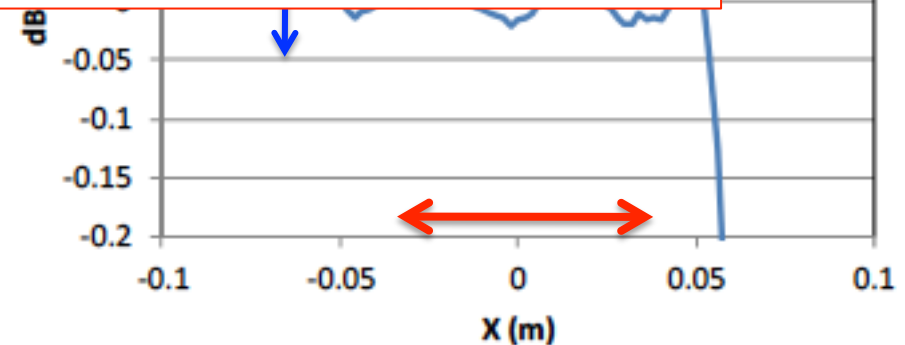
- Outer 2 sector magnets are modified to achieve a precise isochronous field.
- Design of cyclotron-like storage ring



We locate trim coils.

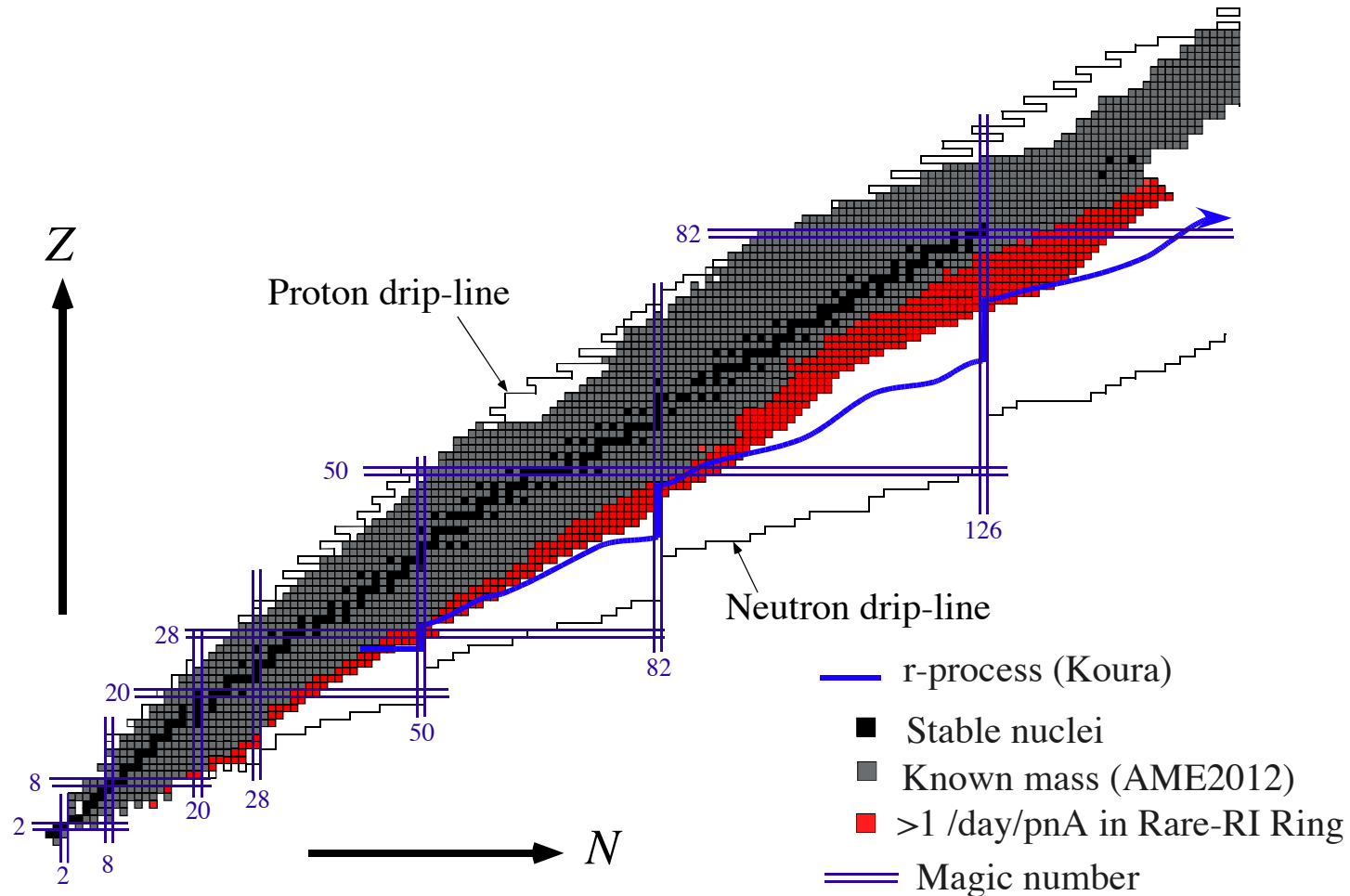


Mass resolution in Rare-RI Ring



Since central field is 1.5T,
 isochronicity is 2×10^{-6} .

稀少RIリングでの質量測定可能領域



スケジュール

FY2013	FY2014	FY2015	FY2016 FY2017
Preparation	Commissioning	Mass measurement	Mass measurement
- Trigger system - Control system - Beam monitor - NMR monitor - Excitation - Chamber baking - Connection to SHARAQ R&D - Kicker system - Schottky system - TOF detector ...	Primary beam Performance check - Individual injection - Extraction - Accumulation - Isochronous tuning	Day 1 experiment ^{78}Ni	Around the waiting point of r-process path $N=50, 82, 126 \dots$

Now!

本課題研究の期間

Rare-RI Ring Collaboration

Spokespersons: A.Ozawa (Univ. of Tsukuba) and T.Uesaka (RIKEN)

Project manager: M.Wakasugi (RIKEN)

Research group:

A.Ozawa (Co-leader), T.Uesaka (Co-leader),

T.Yamaguchi, T.Suzuki, F.Suzaki (Saitama Univ.)

Y.Abe, D.Nagae (Univ. of Tsukuba)

J.Zenihiro (RIKEN), Y.J.Yuan, H.S.Xu (IMP),

T.Ohtsubo (Niigata Univ.)

Detector development group:

T.Yamaguchi (Leader), Y. Abe, D.Nagae, J.Zenihiro

Construction group:

M.Wakasugi (Leader), Y.Yamaguchi, T.Fujinawa, O.Kamigaito,

M.Kase, M.Komiyama, T.Kubo, K.Kumagai, T. Maie, J.Ohnishi,

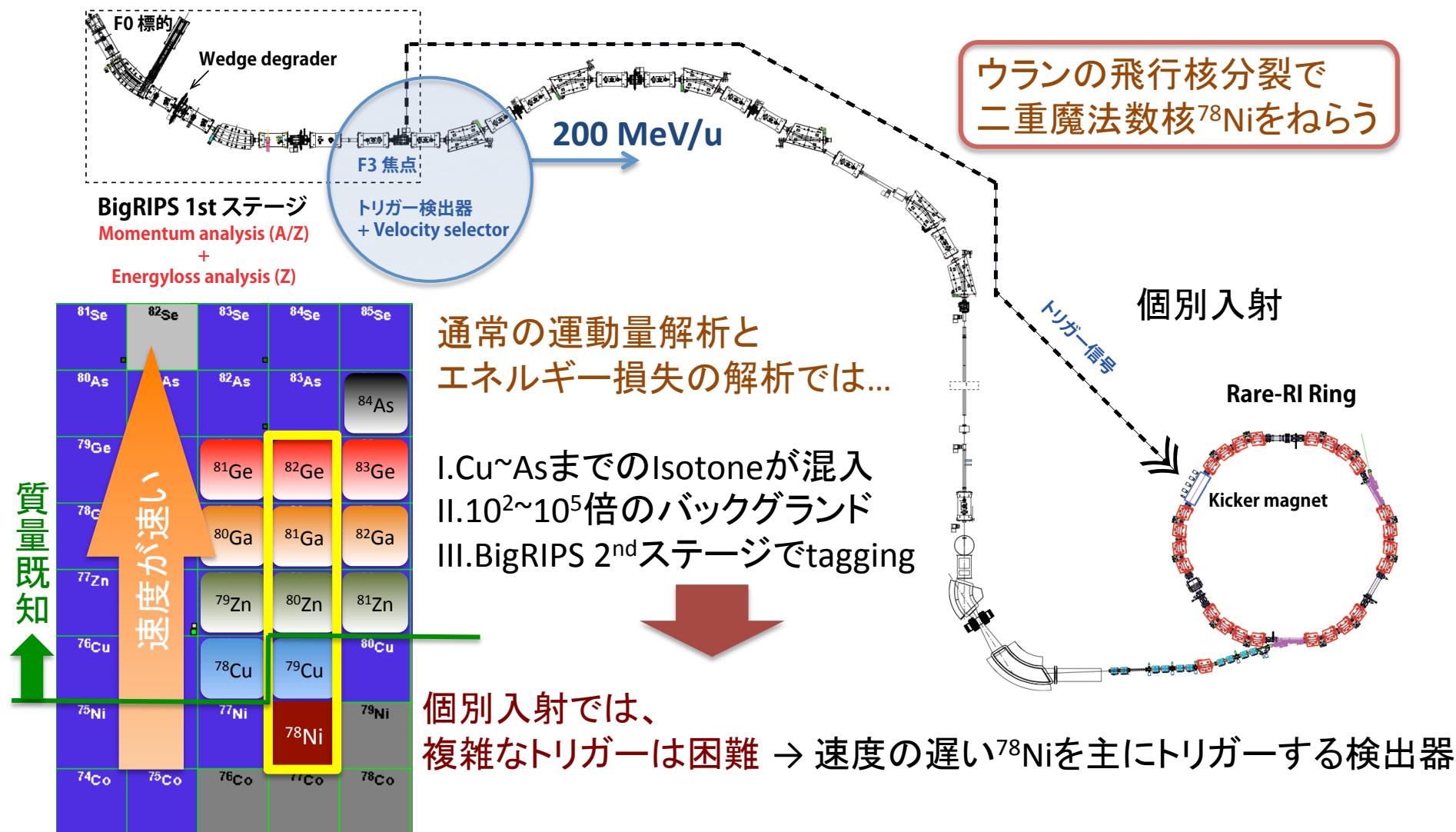
K.Yoshida, K.Yamada, Y.Yanagisawa, Y.Yano (RIKEN)

A.Tokuchi (Nagaoka Univ. of Technology)

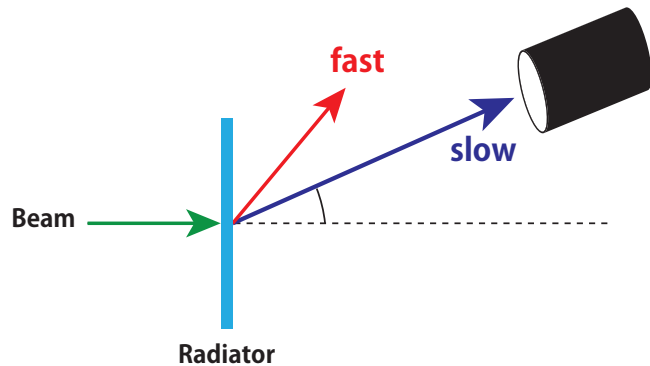
チェレンコフ光を利用したVelocity selectorの開発

～ 目的のRIビームを効率よく蓄積リングに入射する仕組み ～

ビームのS/N向上 → 1次ビーム強度の増大 → ドリップライン核の測定を可能に



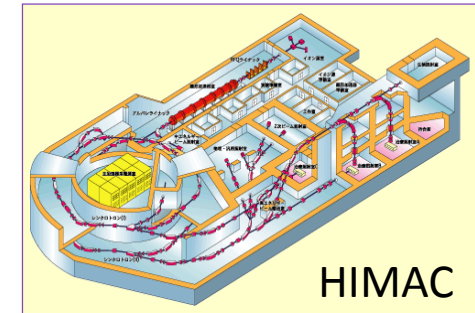
2次ビームVelocity selectorとしてチェレンコフ光を利用



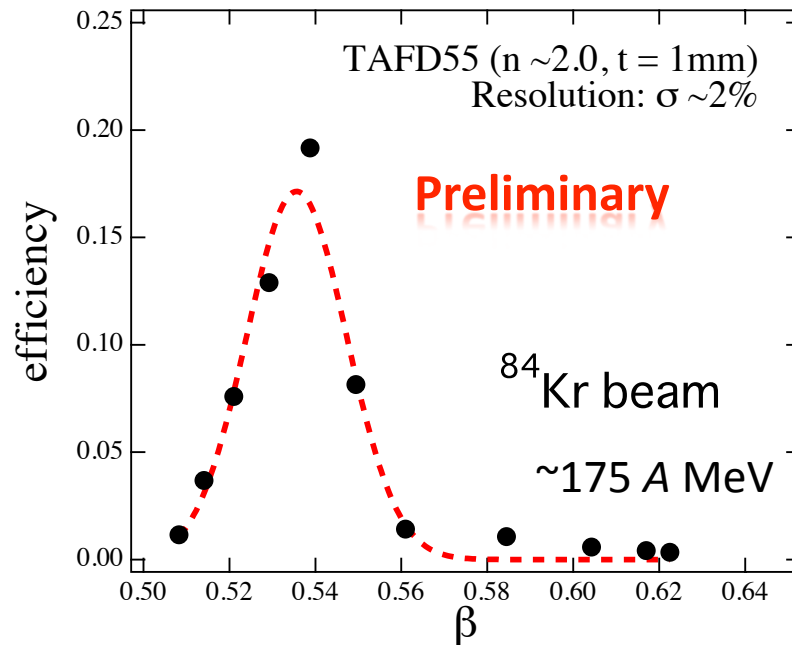
$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

一定の角度(測定する粒子の速度)にくる
チェレンコフ光をトリガーに

放医研の重イオンビームを利用して
試験中



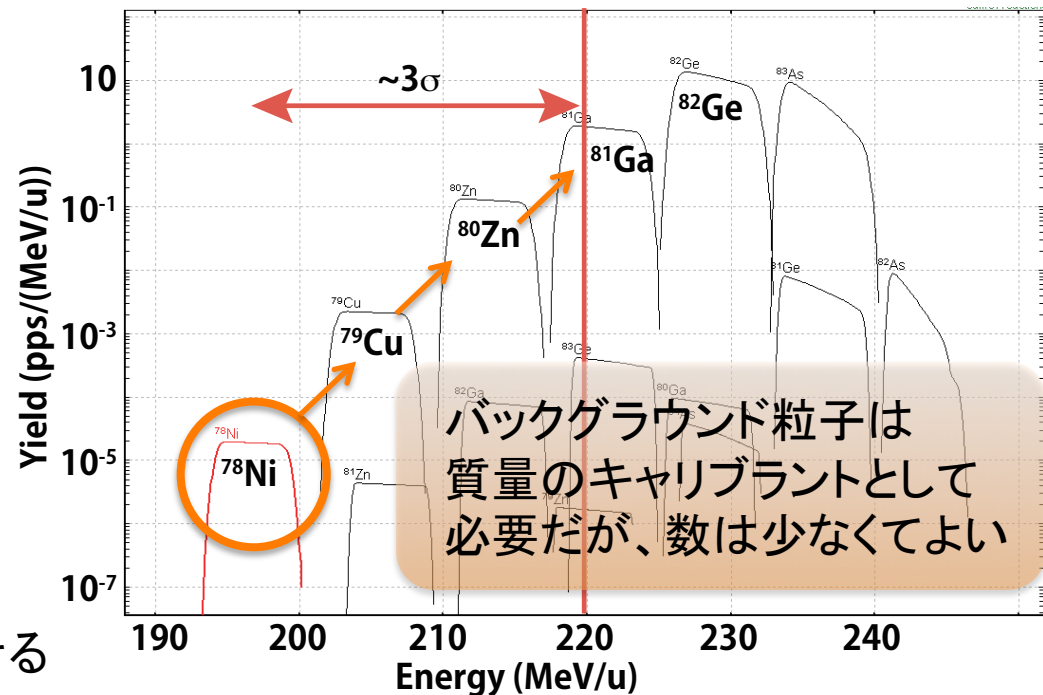
HIMAC



1mmのRadiatorで速度分解能 ~2%

➡ Ga, Geはトリガーしない
相対的に⁷⁸Niの割合を増加させる

F3でのビームのエネルギー分布



まとめ

- エキゾチック核(^{78}Ni)の質量測定は、原子核の状態方程式を理解するために重要。
- 現在、理研RIビームファクトリーでエキゾチック核の質量測定のための稀少RIリング(Rare-RI Ring)の製作が進んでいる。
- 質量測定の鍵となるのは、個別入射と等時性蓄積リング。
- 本研究課題では、個別入射の効率アップのためにチェレンコフ検出器の開発を行っている。
- ^{78}Ni の質量測定(Day-one実験)は2015年度の予定。