

荷電粒子閉じ込め技術を駆使した反物質科学とジオスペース科学の展開

桧垣浩之：広島大学大学院 先進理工系科学研究科 hhigaki@hiroshima-u.ac.jp

永岡賢一：核融合科学研究所

-
- ・ 未来志向であること（既存のテーマの後追いでない）
 - ・ 目標を具体的に示していること（永遠のテーマでない）
 - ・ 10年後に学术界に輝くテーマに育つこと（月並みでない）
 - ・ 多様な「個人のテーマ」を包摂できること（独りよがりでない）

電子－陽電子プラズマ

(magnetic mirror, nested Penning trap, dipole trap, stellarator)

2D オイラー流体 (直線磁場)

軌道のカオス (弱磁場LHD ?)

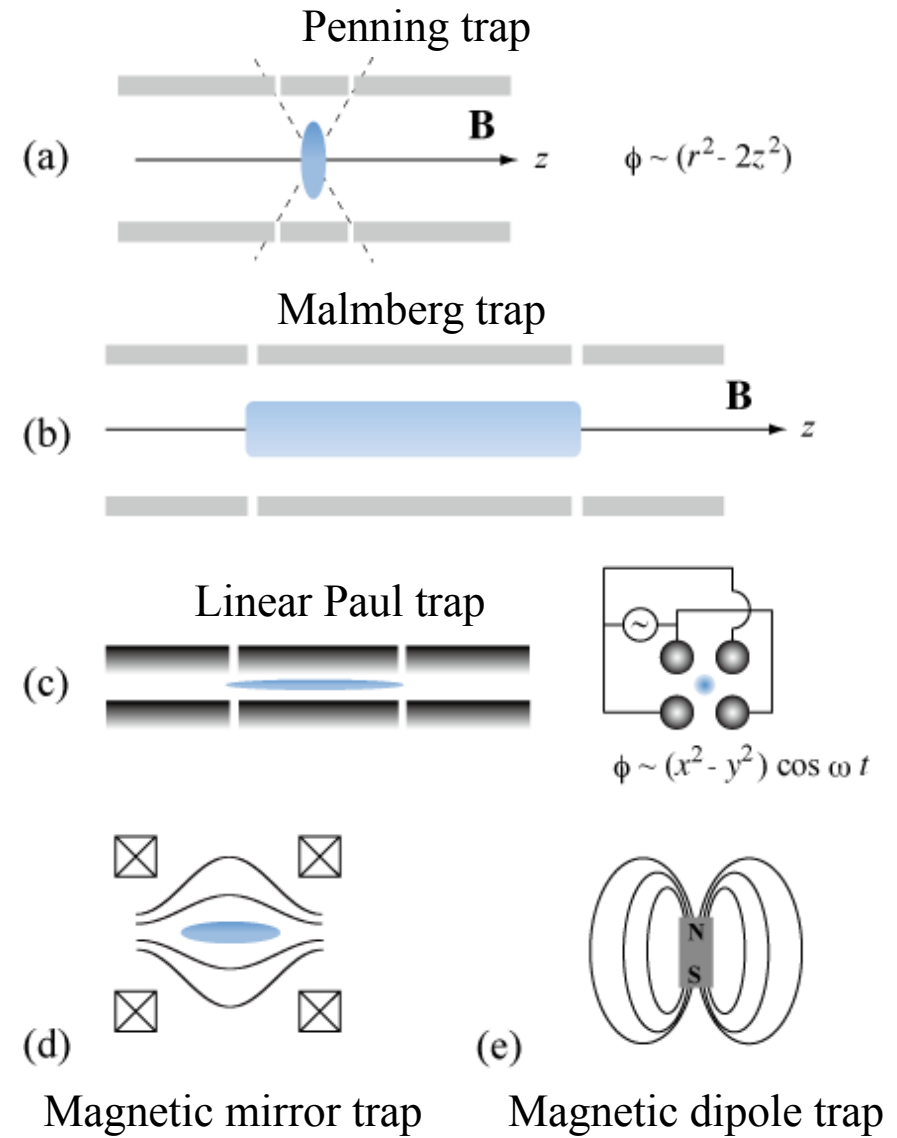
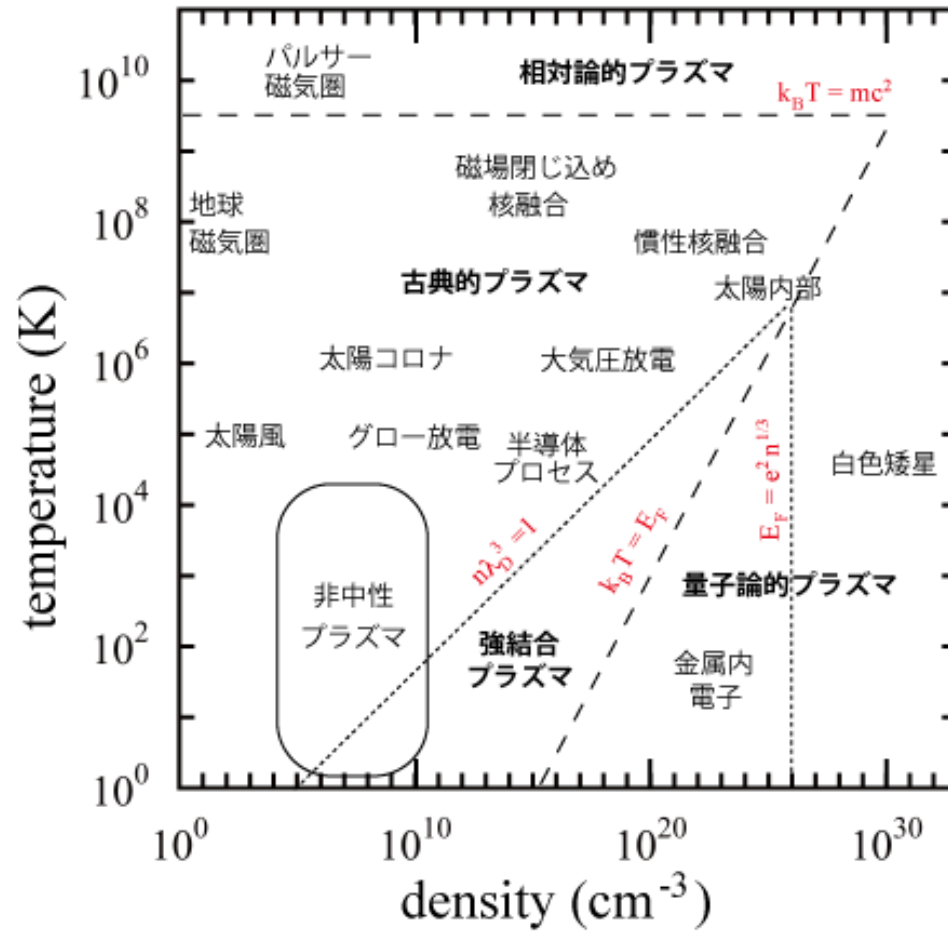
磁気圏プラズマ (dipole磁場)

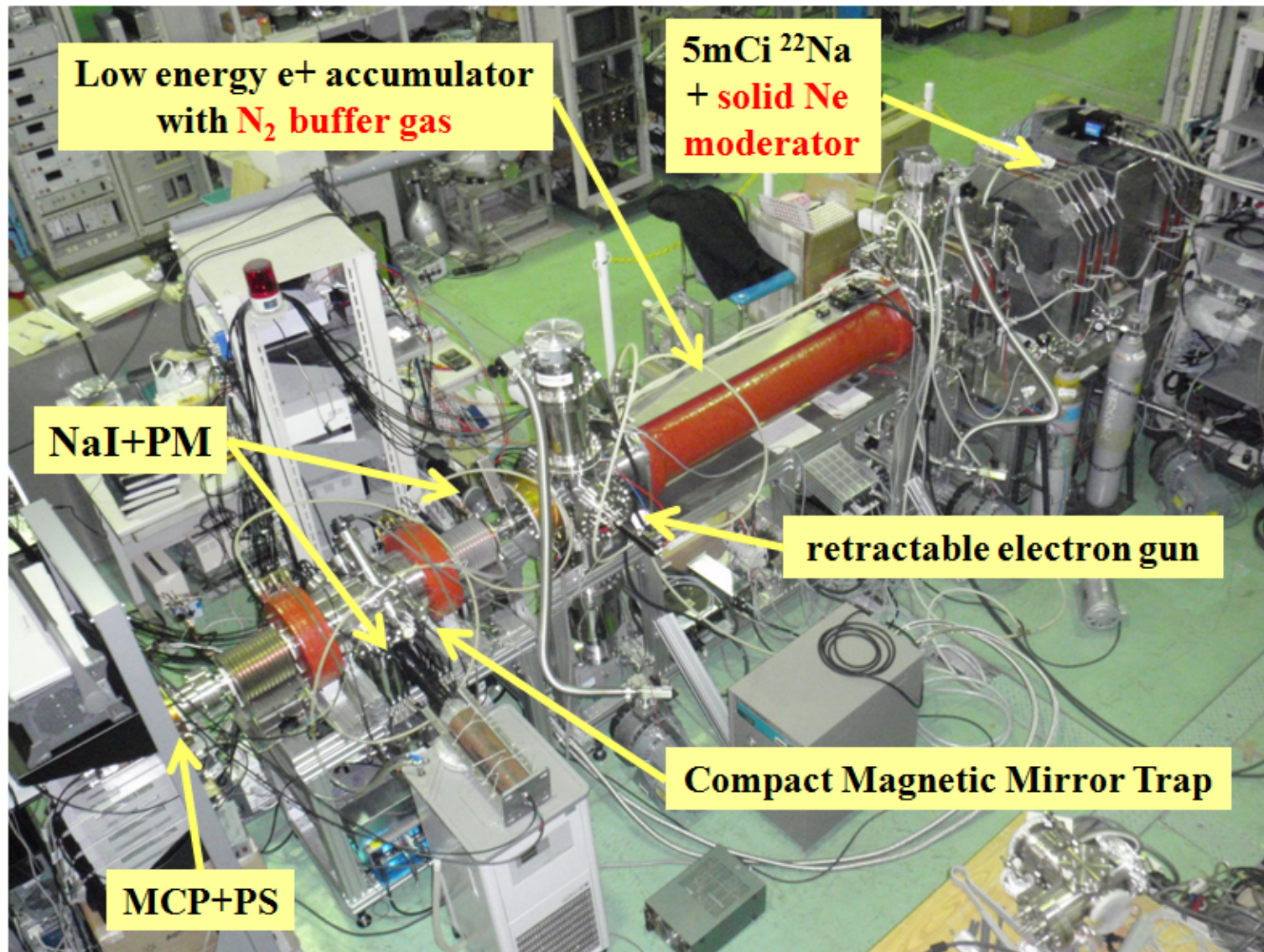
陽電子顕微鏡

ポジトロニウムBEC

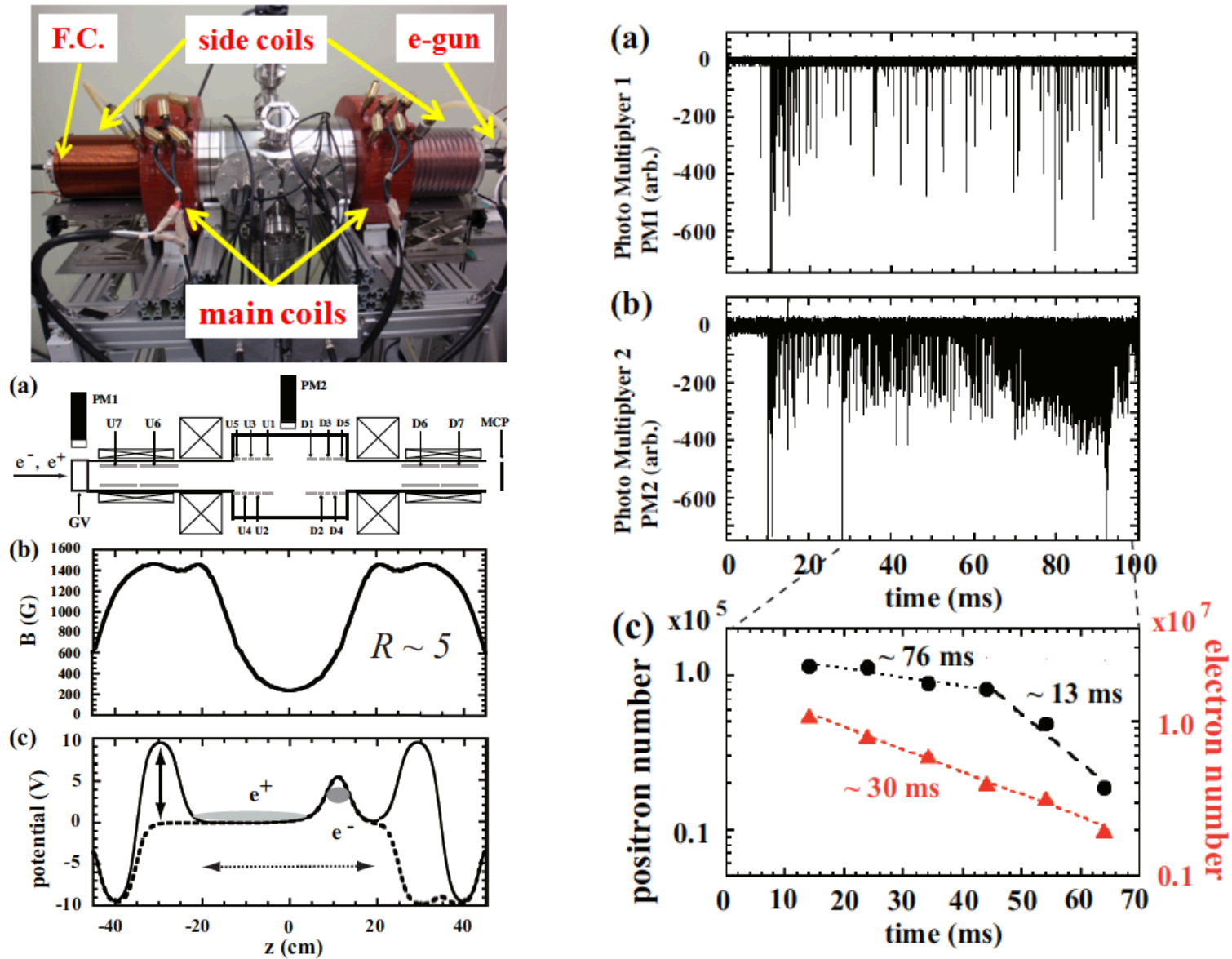
反水素閉じ込め (cusp磁場)

非中性プラズマ



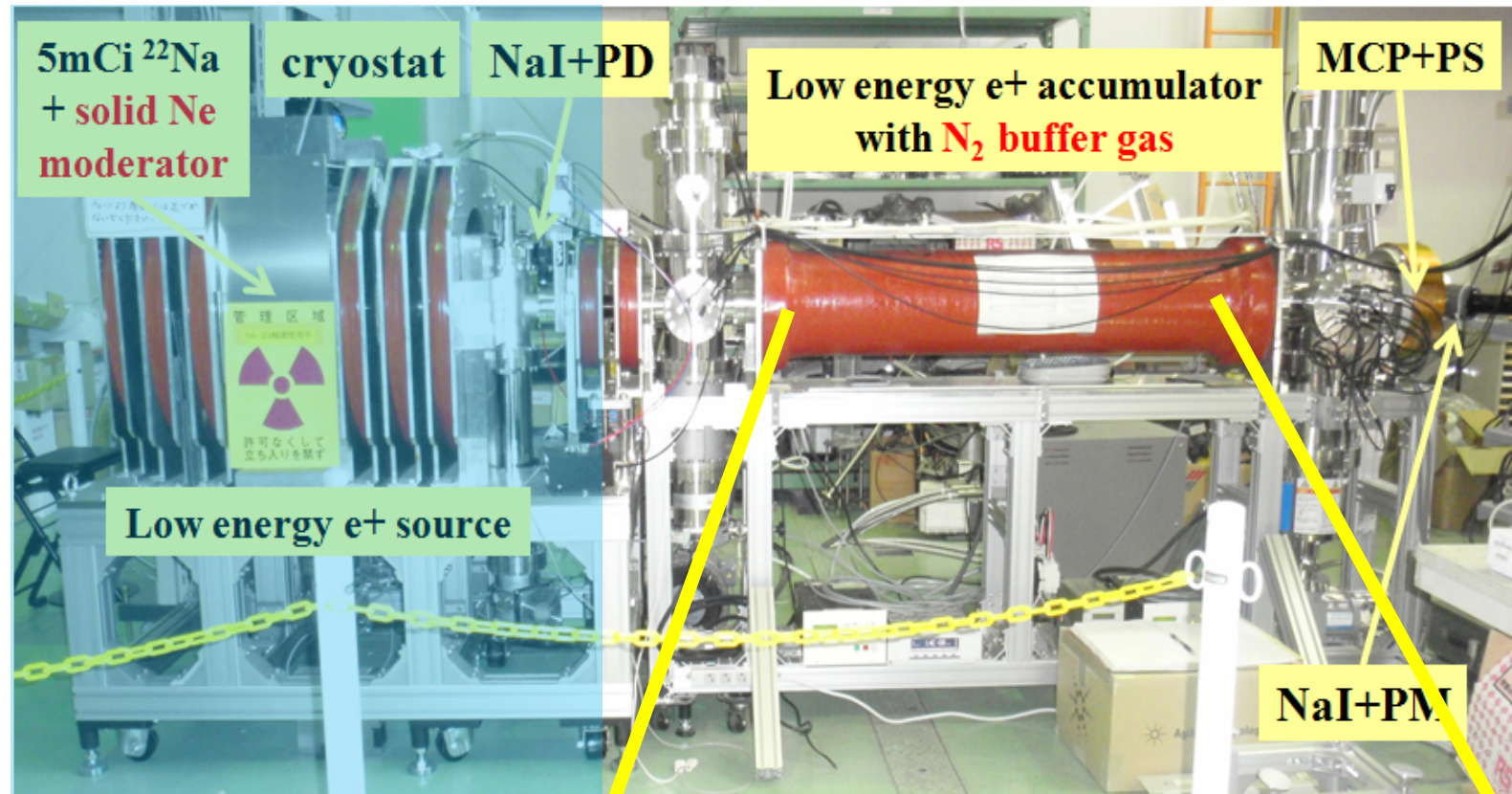


電子-陽電子プラズマ (magnetic mirror)

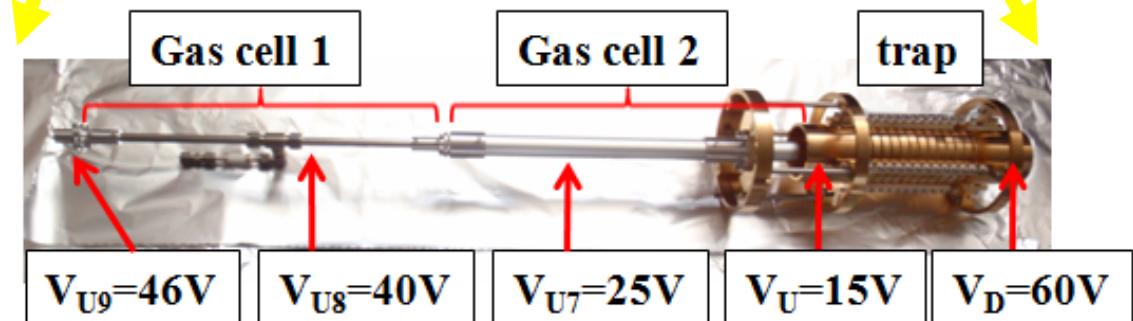


H. Higaki, C. Kaga, K. Fukushima, *et al.*, : New J. Phys. **19** (2017) 023016.

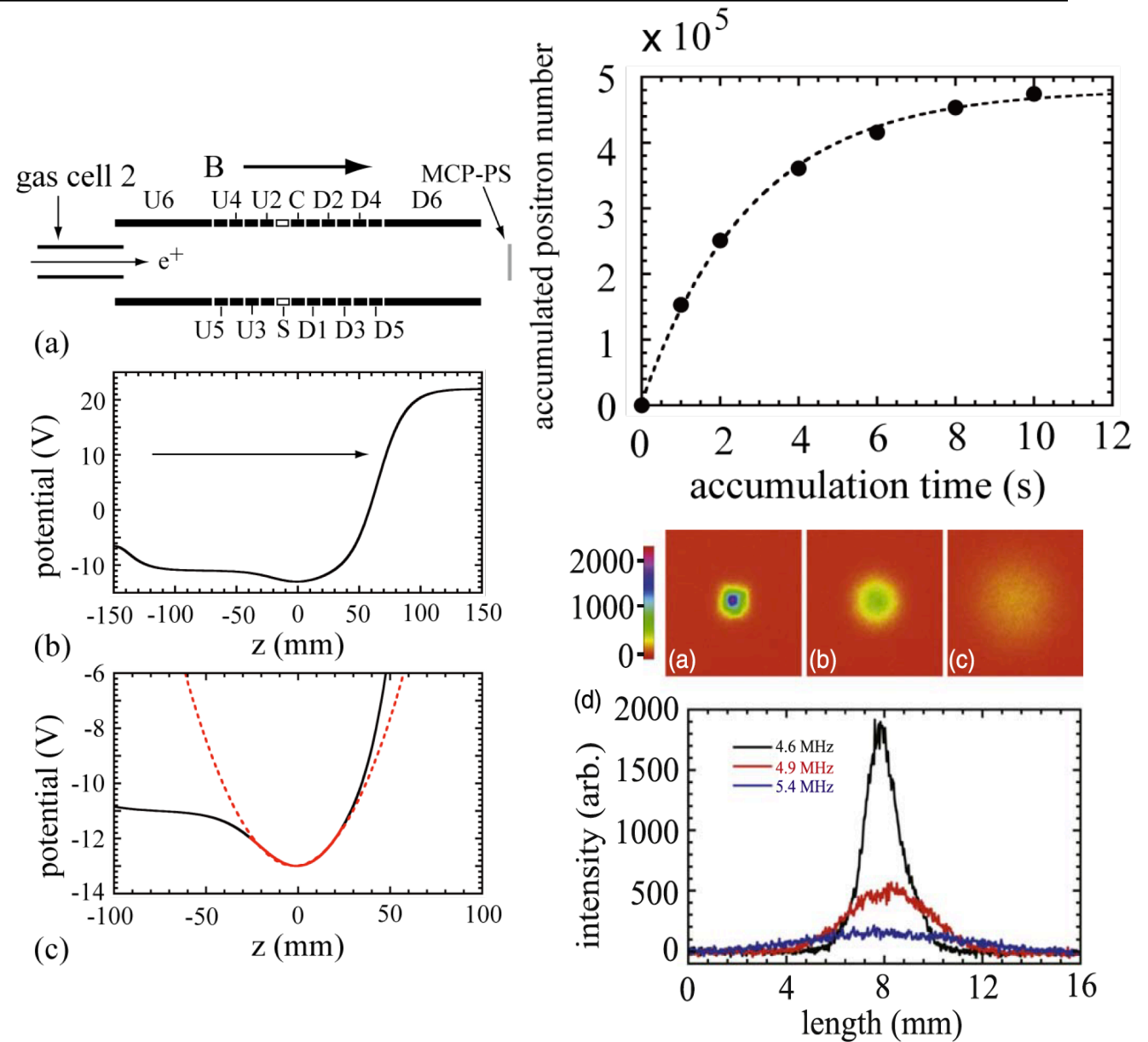
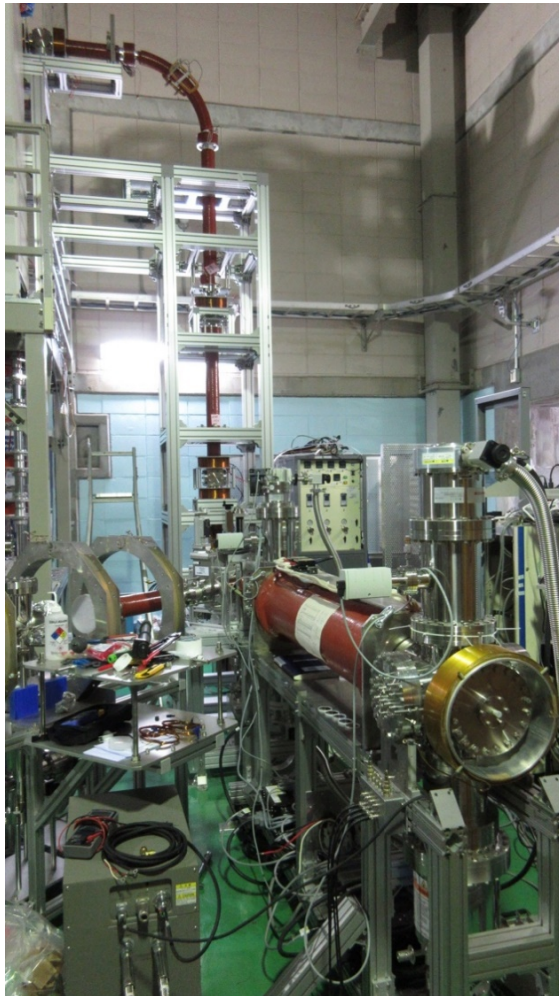
Low energy e^+ accumulator with N_2 buffer gas trap



産総研の低エネルギー陽電子ビームラインの下流に写真右側の低エネルギー陽電子蓄積装置を接続した。



H. Higaki, C. Kaga, K. Nagayasu, et al., : AIP Conf. Proc. **1668** (2015) 040005.



電子-陽電子プラズマ (magnetic dipole, stellarator)

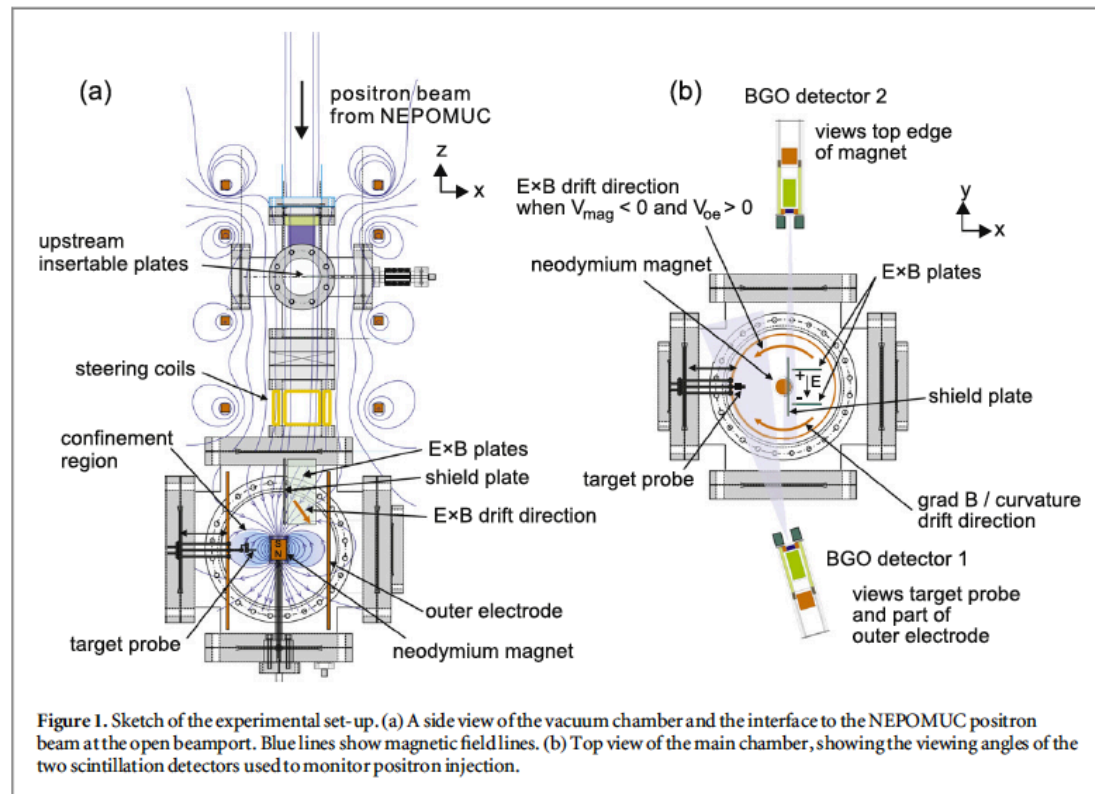
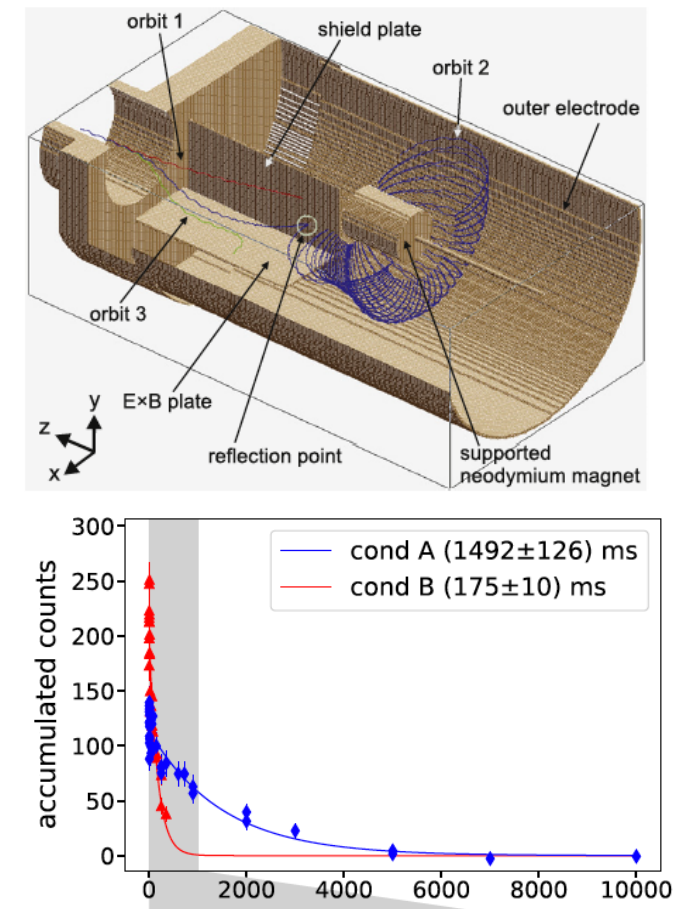


Figure 1. Sketch of the experimental set-up. (a) A side view of the vacuum chamber and the interface to the NEPOMUC positron beam at the open beamport. Blue lines show magnetic field lines. (b) Top view of the main chamber, showing the viewing angles of the two scintillation detectors used to monitor positron injection.



- T. S. Pedersen, J. R. Danielson, C. Hungenschmidt, *et al.*, : New J. Phys. **14** (2012) 035010.
 J. Horn-Stanja, S. Nißl, U. Hergenbahn, *et al.*, : Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 235003.
 E. V. Stenson, S. Nißl, U. Hergenbahn, *et al.*, : Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 235004.
 M. Singer, M. R. Stoneking, E. V. Stenson, *et al.*, : Phys. Plasmas **28** (2020) 062506.
 M. R. Stoneking, T. S. Pedersen, P. Helander, *et al.*, : J. Plasma Phys. **86** (2020) 155860601.

Correspondence to 2D Euler fluid

2D drift-Poisson

$$\mathbf{v} = -\frac{c}{B} \nabla \phi \times \hat{\mathbf{z}} = c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\mathbf{\Omega} \equiv \nabla \times \mathbf{v} = \frac{c}{B} \nabla^2 \phi \hat{\mathbf{z}} \left(= -n \frac{4\pi e c}{B} \hat{\mathbf{z}} \right)$$

$$\nabla^2 \phi = -4\pi e n$$

continuity

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla n = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{\Omega}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{\Omega} = 0$$

2D Euler with a constant ρ

$$\mathbf{v} = \nabla \psi \times \hat{\mathbf{z}} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial y}, -\frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\mathbf{\Omega} \equiv \nabla \times \mathbf{v} = -\nabla^2 \psi \hat{\mathbf{z}}$$

$$\nabla^2 \psi = -\Omega$$

momentum

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

$$\frac{\partial \mathbf{\Omega}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{\Omega} = 0$$

electrostatic potential ϕ $\longleftrightarrow$ stream function ψ

velocity $\mathbf{v}$ $\longleftrightarrow$ velocity $\mathbf{v}$

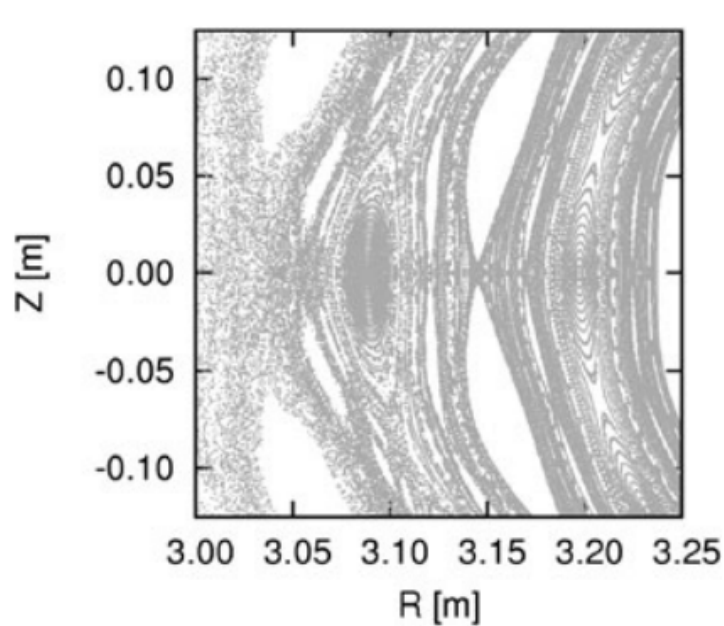
vorticity ($\propto$ density) $\mathbf{\Omega}$ ($|\mathbf{\Omega}| \propto n$) $\longleftrightarrow$ vorticity $\mathbf{\Omega}$

“Experiments on vortex dynamics in pure electron plasmas”

C. F. Driscoll and K. S. Fine, Phys. Fluids **B2** (1990) 1359

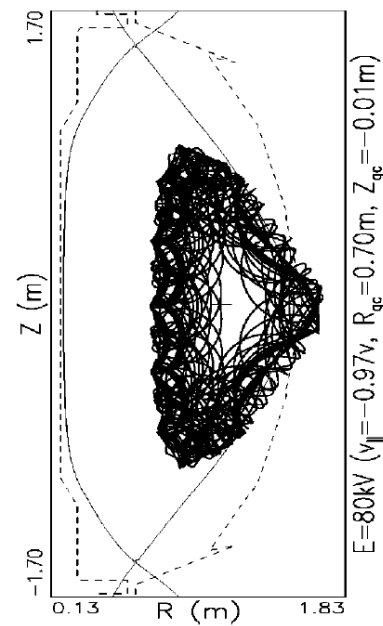
ヘリカル系における磁力線と軌道のカオスの精密解析

- 磁力線, また粒子軌道のカオスは, 輸送や閉じ込め特性に影響を及ぼす
- 陽電子ビームをプローブとして用いることで, 消滅ガンマ線のコインシデンス計測により損失経路の精密な観測や輸送の評価が可能になる
- 低強度 (1MBqまでは管理区域外) のLHDへの導入は比較的容易, 大強度では十分な強度のエネルギー可変 (数百keVまで) ビームの取り出しが可能



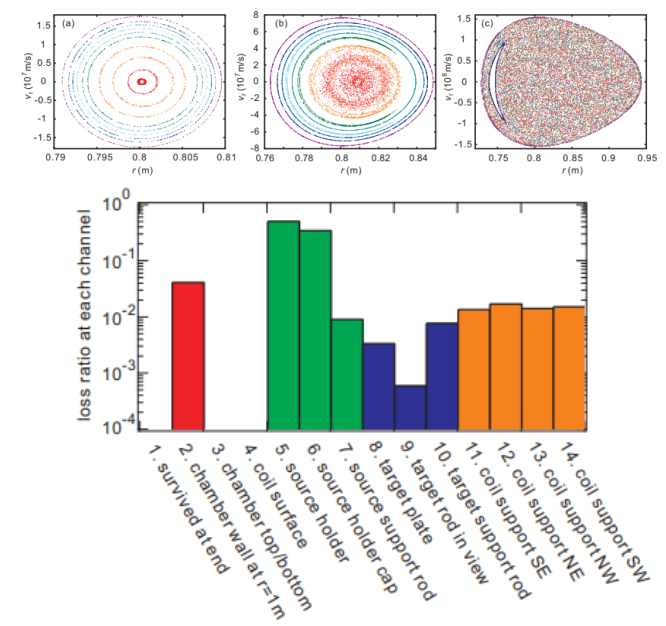
磁気島を持つLHDの磁場

Y. Suzuki: J. Plasma Fusion Res. **94** (2018) 396.



NSTXの粒子のカオス的軌道

J. Carlsson: PoP **11** (2001) 4725.

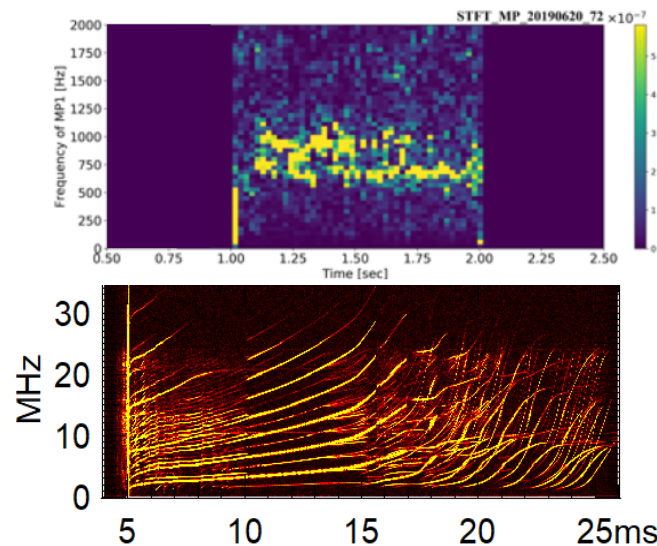


陽電子軌道のカオス化と
消滅γ線による損失経路評価

H. Saitoh+: PRE **94** (2016) 043203.

ダイポール磁場の他分野への応用

- パルサー磁気圏等に観測される電子陽電子プラズマの他にも、ジオスペースで観測されるプラズマ現象(波動粒子相互作用)の実験室研究の可能性
- 輸送や相対論的加速等のダイナミックな現象を駆動する低周波揺動やR波(ホイッスラー, コーラス)は, 自然界や多くの装置で普遍的に観測される
- 大域的に惑星磁気圏と等価な磁場配位での実験を通して, ジオスペースの素過程の理解と宇宙天気予報モデルの高精度化への貢献が期待される



ダイポール実験*で観測される揺動

Z. Yoshida+ Plasma Fusion Res. 1 (2006) 008.
 M. Nishiura+: Nucl. Fusion 59 (2019) 096005.
 N. Kenmochi+: IAEA FEC2020.
 H. Saitoh+ PoP 19 (2012), 064502.

