非線形プラズマ科学セミナー 2023年9月29日15:00-16:00

# ダイポールによる荷電粒子閉じ込めの進展 と電子・陽電子プラズマ計画

東大新領域/NIFSプラズマ装置学ユニット 斎藤晴彦

- 1. ダイポールによるプラズマ研究の進展
- 2. ダイポール磁場における粒子軌道のカオス
- 3. 電子・陽電子プラズマ計画
- 4. まとめと今後の課題







#### 1.ダイポール磁場によるプラズマ研究の進展

・天体現象をヒントに先進核融合や反物質閉じ込めの実現へ



極めて不均一な磁場における集団現象としてのプラズマの緩和

惑星磁気圏の閉じ込め機構を理解して, 先進核融合やプラズマ性能向上の可能性を探る

反物質を安定に閉じ込め、これまで作られたことの ない反物質プラズマの実現とその物理の探求

2000吉田善章 プラズマ核融合学会誌

#### 実験室に作り出す「磁気圏型」ダイポール磁場によるプラズマ研究

リング電流によるプラズマトラップ(RT)



• 単純かつ宇宙で普遍的に見られる磁場構成

高β構造の自己組織化,カオス,異常抵抗, 原子物理やプラズマ基礎実験用のトラップ

コイルの超伝導化/磁気浮上によるプラズマ への擾乱抑制がプラズマ性能向上の鍵となる





#### ダイポール磁場によるプラズマ研究の系譜 その1 核融合

 Spherator/Multipoleによる極小磁場配位実験と古典輸送の検証 (乱流輸送の重要性の発見)



Fig. 2. The cross-sectional view of the FM-1 spherator.



#### Octupole (T. Ohkawa) General Atomics

#### Results of FM-1 Spherator Experiments and Possibility of Electron-Coil Fusion Reactor\*

S. Yoshikawa Plasma Physics Laboratory, Princeton University Princeton, New Jersey 08540 内部導体系プラズマ装置

#### 超高ペータ閉じ込めを目指す内部導体系(ダイポール)実験の再開

$$-\frac{d\ln P}{d\ln r} < 4\gamma = \frac{20}{3}$$

 $\propto r^{-3}$   $P = \propto r^{-20/3}$  交換型不安定性の安定化条件

AKIRA HASEGAWA AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey 07974

> Received May 28, 1987 Contributed by H. Berk

Comments Plasma Phys. Controlled Fusion 1987, Vol. 11, No. 3, pp. 147–151 Photocopying permitted by license only  大きな圧力勾配に対して、ダイポールの急峻な 磁場構造のプラズマは安定化する

• 地球磁気圏などでの観測と一致



 $\frac{\partial}{\partial \psi} \int \int f(\mu, J, \psi) d\mu dJ = 0$  「拡散」は位相空間における密度の平坦化に向かう

- 「磁束間当たりの密度が一定」=「実空間では急峻な密度勾配」の自発形成.
- ・強磁場領域に内向き輸送される粒子の加熱による先進核融合

## Renewed interest on dipole plasmas: RT-1 and LDX



- High-β plasmas in Jovian magnetosphere
- Ultra high- $\beta$  plasma (effects of flow:  $\beta$ >1)
- Application to D-D and D-<sup>3</sup>He fusion
- Self-organization of plasmas in a strongly inhomogeneous dipole field: inward "diffusion" driven by fluctuations

1987 A. Hasegawa, Comm. Plasma Phys. Ctr. Fusion **11**, 147. 2013 Z. Yoshida+, Plasma Phys. Control. Fusion **55**, 014018.

![](_page_5_Picture_7.jpeg)

**Tokyo: RT-1 (Proto-RT->Mini-RT->...)** 2010 Z. Yoshida+, Phys. Rev. Lett. **88**, 095001.

![](_page_5_Picture_9.jpeg)

MIT/Columbia: Levitated Dipole eXperiment 2010 A.C. Boxer+, Nature Phys. 6, 207.

# ダイポール磁場によるプラズマ研究の系譜 その2 非中性プラズマ

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

![](_page_6_Picture_2.jpeg)

現実のトラップでは,電位制御による入射や揺動計測,粒子操作等が必要

![](_page_6_Picture_4.jpeg)

![](_page_6_Figure_5.jpeg)

2000 ALPHA@cern nature

#### 反水素合成を目指して,陽電子と反陽子の閉じ込めに使用されるトラップ電極

![](_page_7_Picture_0.jpeg)

tures of a suggested source of highly stripped heavy ions.

#### HIPAC: 電子雲の作る静電井戸に よるイオンの閉じ込め (->不安定性の出現)

FIG. 1. Schematic view of the experimental setup.

Formation of a Non-Neutral Relativistic-Electron-Beam Ring in a Toroidal Magnetic Field

A. Mohri, M. Masuzaki, T. Tsuzuki, and K. Ikuta Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan (Received 9 December 1974)

A quiescent equilibrium state of a non-neutral beam ring may have been realized when a relativistic electron beam (450 keV, 16 kA, 25 nsec) was injected parallel to a toroidal magnetic field in vacuum. The longest lifetime obtained was 20  $\mu$ sec which corresponded to 3000 revolutions of the electrons around the torus. The lifetime was limited by the appearance of an ion-resonance instability.

# ダイポールによるトロイダル非中性プラズマ研究

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

電子プラズマ生成: LaB6カソード電子銃 測定: emissive静電プローブ(空間電位と電子束) wall probe(金属foil + current amplifier)

![](_page_8_Picture_3.jpeg)

RT-1内部で可視化された磁気面

- >磁気浮上させたdipole磁場コイルにより 惑星磁気圏型配位を生成する装置.
- ▶主要な研究課題は - 先進核融合に適した高βプラズマの生成 - トロイダル非中性プラズマの閉じ込め
- ▶閉じ込め領域の周辺部に配置した電子銃 から電子ビームを供給する.
- ▶電子は初期エネルギーeV<sub>acc</sub>で静磁場中 へと入射される(r<sub>L</sub><~10mm).</p>

### Example of fluctuation measurements in RT-1 1: during and just after the electron beam injection

![](_page_9_Figure_1.jpeg)

- electron injection: t=0-0.1s
- frequency power spectrum at (1) t=0.01s, during beam injection,
  (2) 0.11s, just after stopping injection, (3) 0.2s, and (4) 0.6s.
- turbulence is selectively stabilized to form "stable confinement"

#### Example of fluctuation measurements in RT-1 2: long trapping, there are two trapping modes

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

Another model to estimate the plasma shape: use of a certain function form

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

• density profiles (1) during injection, (2) just after stopping injection, and (3) just before the trapping ended, with assumptions of  $n(r) = n_0 r^{-a}$  at z=0 and constant density on field lines

# ダイポール中の荷電粒子の運動とカオス

**ダイポール中の粒子の周期運動/非周期運動,可積分/非可積分** 2つのミラー反射点での運動エネルギーmv<sub>1</sub><sup>2</sup>/2は同じ(エネルギー保存). µ保存から,反射地点での磁場強度Bが一定になることが分かる. 次にJの保存から,同じ磁場強度となる2点間の磁力線に沿った距離が等しく なる別の磁力線は存在しないので,粒子は異なる磁力線に移らない.

Фの保存は,粒子が磁力線を横切る輸送を起こさない事を述べている.

![](_page_13_Figure_2.jpeg)

自由度nのハミルトン系では,ハミルトニアンの他に(n-1)個の第一積分が独立な保存量として存在する場合には,系は可積分となる

## 断熱不変量を非保存化する2つの方法:低周波揺動による ℒの非保存化と,高エネルギー陽電子に対するµとJの非保存化

- Particle orbit in a dipole field basically consists of three periodic motions, making three adiabatic invariants as actions
- Adiabatic invariants are not always const.
   ex) slow fluctuations break Ψ conservation, while conserving μ and J, causing radial transport and acceleration of particles
- Collective behavior of particles under such constraint makes macroscopic self-organization of plasmas

2015 Yoshida Mahajan, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019 Nishiura+ NF, 2015 Kawazura+ PoP, 2017 Sato+ PRE

 Breakdown of adiabaticity and orbit chaos appear even without fluctuations or asymmetry of the system:
 High-energy positrons in dipole field

![](_page_14_Figure_6.jpeg)

荷電粒子の周期運動の結合によりµとJが非保存化することで, ダイポールの軸対称な系でも粒子運動は非可積分となる

When the three adiabatic invariants are conserved, the Hamiltonian is

 According to Arnold-Liouville theorem, this system is integrable, particles are trapped on periodic orbits in a dipole field

Number of first integral (independent conserved quantity) > degree of freedom

• Non-linear term violates the adiabaticity of  $\mu$ , J, and  $\Psi$ , through the effects of fluctuations, asymmetry, orbit mode coupling, etc.

$$H = \mu \omega_c + J \omega_b + \Psi \omega_d + N_c$$
1990 Murakami, Sato, Hasegawa, PoF

- For high energy positrons, gyro and bounce motions easily couple, which means there are only two constants of motion, H and  $P_{\theta} \sim \Psi$  (axisymmetry)
  - We numerically and experimentally investigate the chaotic behavior of positrons from Na-22 isotope in a dipole field

## 陽電子軌道のカオスの効果の検証と, 高効率の入射方式 への応用の可能性

 Positrons are injected from a Na-22 source located at the edge of the confinement region of RT1
 2016 Saitoh+, PRE

![](_page_16_Figure_2.jpeg)

RT1 (Ring Trap 1), superconducting levitated dipole of Uni. Tokyo, Japan

 In a dipole field generated by a ring current of 250kA (R=0.25m), orbit is calculated by numerically integrating

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Relativistic adiabatic invariants:

$$\mu = \int \gamma v_{\perp} dl = \int \frac{\gamma^2 v_{\perp}^2}{B} dt$$
$$J = \int \gamma v_{\parallel} ds$$
$$\Psi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

2006 Yoshida+ PFR, 2010 Yoshida+ PRL

## 陽電子の運動エネルギーやピッチ角により,周期的/カオス的に 見える軌道が出現する

![](_page_17_Figure_1.jpeg)

Top view of RT1, including typical orbits of positrons injected from Na-22 source

 Particle motion consists of gyro + bounce + toroidal drift

superconducting Toroidal motion is realized by the curvature and grad-B drift

- Orbit properties are different according to particle energy
  - 1keV: periodic, return to Na-22 source after one circulation
  - 100keV: non-periodic motion

![](_page_17_Figure_8.jpeg)

ジャイロ運動とバウンス運動の結合(両者の区別が難しくなる)に 伴い, μとJが非保存化する

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

- μ and J are conserved
   for 1 keV positron
- motion is periodic
- gyro and bounce motions are separated
- μ and J are not conserved for 100 keV positron
- motion is non-periodic
- gyro and bounce motions are overlapped

 $\Psi$  is always conserved due to the asymmetry

### µとJが保存しない場合,保存量は2つ(エネルギーとΨ)<系の 自由度となりカオス軌道が出現する

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Poincaré plot of orbit in the phase space for different pitch angles for positrons of kinetic energy 1, 20, and 100 keV

- Considerable ratio of positrons from Na-22 source exhibits chaos in the geometry of the RT1 levitated dipole
- Such particles may have long orbit (i.e., long trapping time) in RT1 before annihilation by recombination at the source

#### 運動エネルギーだけでな $\langle , \mu \rangle$ Jの保存/非保存はピッチ角 にも強い依存性を示す

![](_page_20_Figure_1.jpeg)

 $10^1 \ 10^2$ 

frequency (MHz)

10<sup>3</sup>

10<sup>0</sup>

2

4 time (µs)

6

8

10

particle energy and pitch angle

#### カオス軌道を取る陽電子は,周期運動後に線源で消滅するとは 限らず,長い軌道長をもつものが存在する

![](_page_21_Figure_1.jpeg)

Flight length of single particle:

- e+ in periodic motions return to source just after single gyro/bounce motion
- positrons with chaotic orbits make multiple toroidal circulation with longer flight time

![](_page_21_Figure_5.jpeg)

## 放射線源を十分に小さくして再結合を抑制することで,希薄な トロイダル陽電子雲が定常的に生成される

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

Flight time and length reflecting energy distribution:

• Na-22 source size ( $r_{source}$ ) limits the flight time

 $\frac{dN_1}{dt} = \int \Gamma dS - \frac{N_1}{\tau}$  particle balance inside the hollow cloud

- with a source of r<sub>source</sub> = 0.5cm (-> averaged flight time: 50 μs) and100 mCi (3.7 GBq), a hollow could of ~1×10<sup>4</sup> positrons are steadily generated
- if 1% of e+ from the source are transported inward by rotating wall, and assuming 1000 s trapping time,  $N_1 \sim 10^{10}$  is expected in strong field region

#### Na-22線源を使用したカオスの効果を含む軌道計算の検証

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

![](_page_23_Picture_2.jpeg)

- Positrons injected from a 1 MBq (27  $\mu$ Ci) Na-22 source at the edge confinement region
- Target probe at the opposite side detect e+ by coincidence measurements of 511 keV γs
- Orbit calculations including the chaotic effects well reproduced the experimental results

# ダイポール磁場による電子・陽電子プラズマ 生成と物性解明の計画

# 電子・陽電子ペアプラズマとは?

# 電子と陽電子からなる質量対称性を持つ物質・反物質プラズマ

• 通常のプラズマはイオンと電子から構成 $(m_{e} < < m_{i})$ 

![](_page_25_Figure_3.jpeg)

電場へのイオンと電子の異なる応答は様々な集団現象を生み出す が,ペアプラズマは例えば既存の電磁流体力学で記述されない 2020 Stoneking, Saitoh (9/25)+ J. Plasma Phys.

ペアプラズマ(m<sub>e+</sub>=m<sub>e-</sub>)は特異な波動特性と安定性を示す(次頁)
 ➡ 実験的に未検証の諸性質(基礎プラズマ物理),プラズマ現象

電子・陽電子群はパルサー磁気圏等の宇宙環境に広く存在

➡ ガンマ線バーストに関わる無衝突衝撃波とWeibel不安定性,構造形成

実験的にペアプラズマ生成は陽電子の大量蓄積の実現を経て達成

ポジトロニウム(電子と陽電子の束縛系)のBose-Einstein凝縮,
 コヒーレントなガンマ線レーザ,反水素実験等への波及効果

# e+/e-プラズマ研究の経緯とダイポール磁場の活用

- 理論·数値計算を中心とした研究の進展
- ・縮退した分散関係(波動特性)

![](_page_26_Figure_3.jpeg)

イオン・電子プラズマ(左)とペアプラズマ(右)の分散関係\*. 各島はプラズマ中の異なる波動のモードを示す. • 運動論による強靭な安定性の予言

![](_page_26_Figure_6.jpeg)

#### 規格化した温度/密度勾配に対する安定性解析\*\*

1978 Tsytovich&Wharton, Comm. Plasma Phys. Cntr. Fusion\* 2014 Helander, Phys. Rev. Lett.\*\*; 2017 Stenson, J. Plasma Phys.

・安定性,衝撃波,宇宙プラズマに関する理論研究

この分野の論文数 > 4000 (Web of Science 2022)

• 実験研究の試みと現状

Tsytovich&Wharton (1978)の提案以来, 磁場閉じ込め電子・陽電子プラズマは 実験的には実現していない

![](_page_26_Picture_13.jpeg)

# なぜこれまで未解決で,なぜ今可能にできるか?

- 電子・陽電子系は活発な理論研究対象であるが、プラズマ条件を満たすには
  - •10<sup>10</sup>以上という大量の陽電子を集積し,更に
  - 同数の電子と同時捕獲することが挑戦的,実験的に未踏の領域

![](_page_27_Figure_4.jpeg)

#### 該当分野における近年の進展

人工磁気圏による任意非中性度のプラズマ閉じ込め(核融合研究から派生)

1987 Hasegawa Comm. Plasma Phys. Cnt. Fusion, 2004 Saitoh+ Phys. Rev. Lett., 2010 Yoshida, Saitoh+ Phys. Rev. Lett.

2. 陽電子線技術と蓄積法の飛躍的進展,人工磁気圏への入射と閉じ込め実証

2015 Saitoh+ New J. Phys., 2018 Stenson, Saitoh(6/11)+ Phys. Rev. Lett., 2018 H.-Stanja, Saitoh(5/11)+ Phys. Rev. Lett.

#### → 学際研究を通して,電子・陽電子プラズマが原理的に実現可能となった

![](_page_28_Picture_0.jpeg)

![](_page_28_Picture_1.jpeg)

![](_page_28_Picture_2.jpeg)

**该融合科学研究**》

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

広島大学

#### 永久磁石ダイポールへのパルス陽電子入射実験@産総研

- 産総研 + 広島大学のライナック + バッファガストラップ陽電子源
   にIPP/東大の永久磁石ダイポールトラップを接続 ~10^5 e+ /pulse
   全量を捕獲できれば従来の100倍程度の捕獲数(プラズマ条件の達成はまだ困難)
- ガイド磁場(+ステアリングコイル)+ExBドリフト入射(先行研究で実績)

![](_page_29_Figure_3.jpeg)

#### 永久磁石ダイポールトラップ中の軌道計算

入射電極やバイアス可能なマグネットの作る電磁場中で陽電子の軌道を計算
 ビームの空間的や温度の拡がりを考慮して複数粒子を計算する

![](_page_30_Figure_2.jpeg)

#### トロイダル方向の一様化時間は閉じ込め時間より十分短い

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

入射実験の現実的な温度(~eV)時,閉じ込め初期の~100usで一様化する

![](_page_31_Figure_3.jpeg)

多数粒子の100us飛行後の 平均トロイダル周回数(左) とその分散(右)

# 小型磁気浮上ダイポールの構成

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

2020 Saitoh&Stoneking&Pedersen Rev. Sci. Instrum. (Editor's Pick及びScilightに選定)

### 計画している小型ダイポールでは,低エネルギー陽電子でも 十分にカオスの効果が出現する.

Classification of low energy e+ orbit type in a weak dipole field

![](_page_33_Figure_2.jpeg)

Broad "chaotic orbit" region exists between "regular" and "untrapped" orbit regions, depending on injection parameters and coil configurations.

# 計画している小型ダイポールでは,低エネルギー陽電子でも 十分にカオスの効果が出現する.

Poincaré plot for various injection conditions

![](_page_34_Figure_2.jpeg)

**Separatrix** (dipole + levitation coil) config.

![](_page_34_Figure_4.jpeg)

![](_page_34_Figure_5.jpeg)

- Even low energy e+ (~10eV) orbit can be chaotic
- Effects of separatrix (L coil) enhance chaotic orbit
- Some particles in chaotic orbit exhibit long flight time

# 小型磁気ダイポールではセパラトリクスの効果が大きく (閉じ込め領域に近いため),カオスの出現に寄与する

![](_page_35_Figure_1.jpeg)

Orbit type (blue: regular, green: marginal, red: chaos) for different kinetic energy and pitch angle, when the dipole field coil radius is a:7.5, b:10, c:12.5, d:15, e:17.5, f: 20cm.

![](_page_35_Figure_3.jpeg)

Effects of separateix, by adding a:0%, b:10%, c:15%, d:20%, e:25%, f:30% of floating coil current to the levitation coil current. (color contour is similar to (a)).

#### まとめと今後の課題

- ダイポールによるプラズマ閉じ込め研究の経緯と最近の研究例を紹介した。
- ダイポールは、惑星磁気圏など宇宙空間で普遍的に存在する磁場であり、 高ベータプラズマの自発的な閉じ込めが観測されている。
- 超伝導コイルを磁気浮上したRT-1では、局所ベータが100%に達する 高温プラズマの閉じ込めや、純電子プラズマの安定生成が実現された。
- 単一粒子の挙動について、内向き輸送を駆動する低周波揺動に依らずに 第一、第二断熱不変量が非保存となり可積分となる軌道がある。
- RT-1装置でNa-22線源から供給される陽電子の軌道を調べ,有意な割合の粒子軌道がカオスとなること,カオスによる長い飛行時間を確認した.
- 電子とその反粒子である陽電子の非中性プラズマを生成し、さらに混合して電子・陽電子プラズマ(反物質ペアプラズマ)の生成計画を進めている、
- ペアプラズマ用に製作を進めている小型磁気浮上ダイポールでは、 低エネルギー陽電子の軌道にもカオスが現れる。