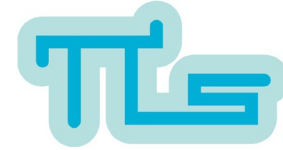




NINS
National Institutes of Natural Sciences

S O K E N D A I



科研費
KAKENHI

デジタルアーカイブ・ プラズマデータの没入型VR可視化解析

大谷寛明^{1,2}, 中西秀哉², 小川国大^{1,2}, 大野暢亮³, 陰山 聡⁴, 増崎 貴^{1,2}

¹NIFS, ²総研大, ³兵庫県立大, ⁴神戸大

H.Ohtani^{1,2}, H.Nakanishi², K.Ogawa^{1,2}, N.Ohno³, A.Kageyama⁴, S.Masuzaki^{1,2}

¹NIFS, ²SOKENDAI, ³U. Hyogo, ⁴Kobe U.

Acknowledgments

The author HO thanks Prof. Osakabe and Prof. Tanaka of NIFS for fruitful discussion. This work was performed with the support and under the auspices of the NIFS Collaboration Research program (NIFS24KIII001, NIFS25KIGM005), and it was partially supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (C) (23K11128). This work was also performed on “Plasma Simulator” system of NIFS with the support and under the auspices of the NIFS Collaboration Research program (NIFS24KISI001).

目次

- **最近のVR装置を使った可視化解析研究について**
- **NIFSにおけるVR可視化解析研究**
 - **Virtual-LHDとDigital-LHD**
- **CHSの3Dモデルデータ**
- **VR可視化解析の例**
 - **Virtual-LHDの拡張: 没入型VR装置を使った可視化**
 - **Digital-LHDの開発: HMDを使った可視化**
- **VR可視化解析の今後の可能性について**
- **まとめ**

最近の**VR**装置を使った 可視化解析研究について

- 核融合プラズマデータをVR可視化する研究が最近投稿されている
 - N. Bhatia et al. proposed a workflow to handle and visualize complex and large-scale experimental and simulation data(Frontiers in Physics 13:1569248 (2025))
 - G. Foss et al. demonstrated immersive VR visualization of laser plasma simulation results(Photonics, 12(5), 436 (2025))
 - S. Gazzotti et al. applied VR/AR visualization techniques for fusion reactor design(Fusion Eng. Design, 172 (2021), 112780)
- シミュレーションデータと装置CADデータとを一緒に表示→基本的には観察することが目的

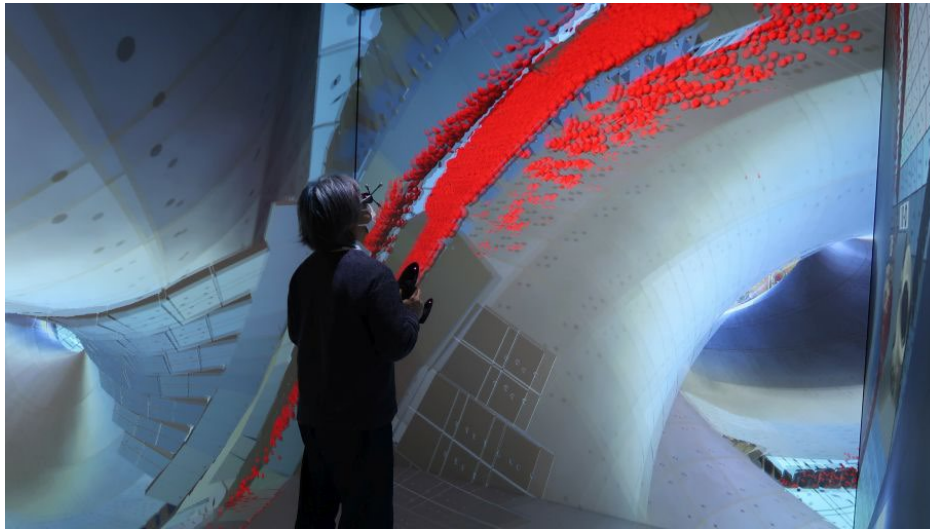
VR可視化解析の重要な特徴

- VRの特徴である**対話性**をフル活用すること
- 観測者が様々な視点や視線方向から観測することはもちろん
- VR空間中で観測者が好きな個所に、例えば磁力線の出発点を置いて、リアルタイムで計算結果を観測することができる。
- シミュレーションデータと実験データの両方を、単なる受動的な閲覧にとどまらず、**能動的に探索・解析**できる

NIFSにおけるVR可視化解析研究

- 1997年CAVE型[1]VR装置CompleXcope[2]の導入
- 2016年HMDの導入
- 大学院教育でも活用

Virtual-LHD



VR visualization by the large-scale VR system CompleXcope

Digital-LHD



Operation with Head-Mounted Display (HMD)

VR 装置: CompleXcope (CAVE type)

Cruz-Neira, C. et al: ACM SIGGRAPH 93 (1988) 65.

1. CompeXcopeの基本構造

- 部屋サイズの4面スクリーン（正面、右、左、床面）
- 液晶シャッター眼鏡
- ワンド（Flystick2）（3次元マウス）
- DLPプロジェクター
- ステレオ音響システム

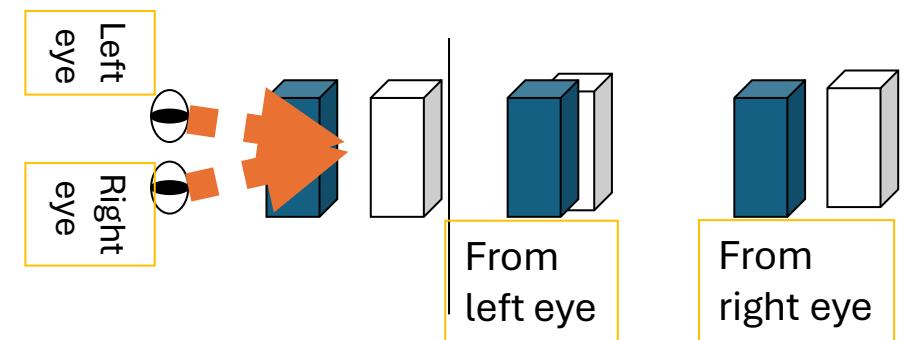
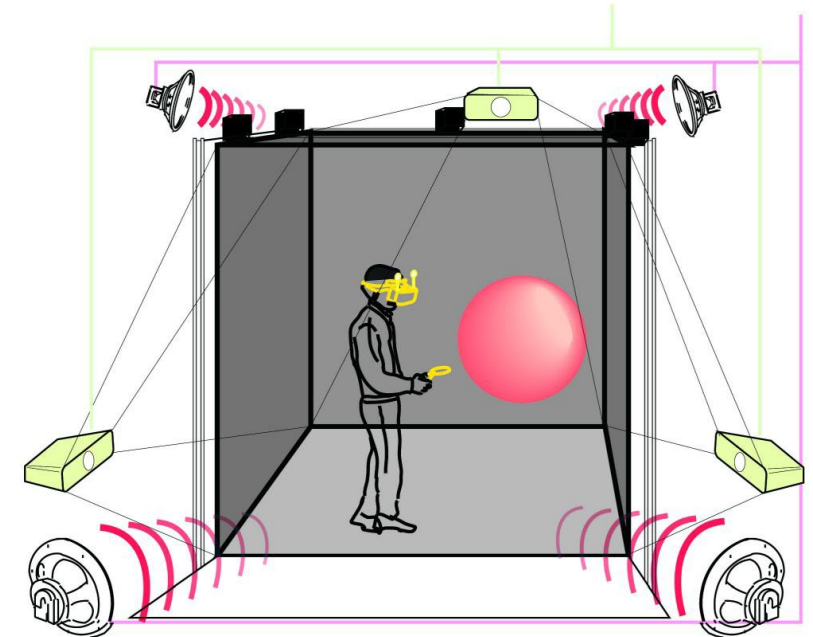
2. 立体視の仕組み

- 人間の目は自然にわずかに異なる画像を見ており、脳がそれらを統合することで奥行き（3D効果）を知覚
- 液晶シャッター眼鏡にはBluetoothが搭載されており、スクリーン上の映像表示と同期してシャッターの開閉。
- 映像の切り替え周波数は128Hz。これにより、鑑賞者は左右の映像が同時にスクリーンに表示されているかのように感じる。

3. 光学トラッキングシステム

- このシステムは、赤外線カメラによって眼鏡およびFlystick2の位置と向きを検出
- 頭の動きやFlystick2による操作に応じて、スクリーン上の物体が再描画

これらのシステムにより、単に映像を見るだけでなく、「その場にいる」かのような体験が可能になります。



VR 装置: ヘッドマウントディスプレイ HMD

1. HMDの基本構造

- ヘッドマウントディスプレイ (HMD) は、頭部に装着する表示装置
- 両目の前に小型ディスプレイを配置し、高い没入感を実現

2. 立体視の仕組み

- 人間の目は自然にわずかに異なる画像を見ており、脳がそれらを統合することで奥行き (3D効果) を知覚
- HMDは左右の目に異なる映像を提示することで、三次元の仮想空間を作り出す。

3. トラッキングと6DoF

- **6DoF (6自由度)**
 - **回転運動 (Rotations)**
 - ヨー (左右の回転) ピッチ (上下を見る動き) ロール (傾き)
 - **並進運動 (Translations)**
 - 前後移動 左右移動 上下移動
 - トラッキング機能により、頭や手の動きがリアルタイムで仮想空間に反映されます。
- これにより、単に映像を見るだけでなく、「その場にいる」かのような体験が可能になります。



VR 装置: 裸眼立体視ディスプレイ

- SONY 空間再現ディスプレイ
 - リアルタイム視線認識技術で立体映像
 - リアルタイム映像生成アルゴリズム
 - マイクロオプティカルレンズ
 - Unity, UNREAL ENGINE4に対応

CHSの3Dモデルデータ

レーザースキャン・フォトグラメトリ

レーザースキャン

- スキャナーから照射されたレーザーによって、対象物の空間位置情報を取得する計測
- 反射光の時刻、照射角度
- 各点ごとに、3次元座標、カラー情報、反射強度、反射率、角度情報など
- 得られた点群データを処理

株式会社 岩崎

Revopoint

Scaniverse

- LiDARスキャン：Light Detection and Ranging、レーザースキャンの一種

iPhone SE以降 iPad(第5世代以降)
及びiPhone 6s以降 及びiPad Pro

- フォトグラメトリ：被写体を様々な角度から撮影し、その画像を解析して3Dモデルを作成する技術
ガラスや光沢のある素材は苦手

Scaniverse

- 3D Gaussian Splatting：メッシュ（三角形の集合）や点群ではなくガウス分布で表現する。

日本写真印刷
コミュニケーションズ株式会社



まちのデジタルアーカイブ化

<https://x.com/view0608/status/1653935076340801537>

<https://x.com/view0608/status/1766353957901992255>

<https://x.com/view0608/status/1641990604149366784>

兵庫県職員 藤井友也さん

3D Gaussian Splatting

メッシュ

点群

- シーンを多数の**3次元ガウス分布の集合**として表現し、高速に新規視点画像を生成する手法。
- 位置情報(x, y, z)、回転（クォータニオン）バラツキ(σ)、透明度(α)、色（Color）などの情報
- Splat：“Splat”は何かが強くと衝突して、平らに広がる様子を表現する言葉
- 3D GaussianをSplatすると、3D Gaussianが2D画面に投影する。

https://note.com/andpad_zero/n/n0bea3d180bc0

CHSのスキャンデータ



VR可視化解析の例

Virtual-LHD と Digital-LHD

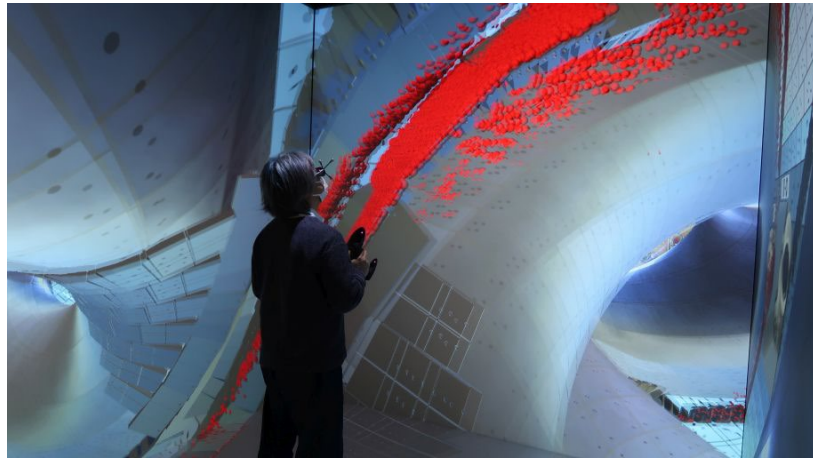
- HINTコードによるLHDの平衡プラズマデータを読み込んで可視化を行うVR可視化ソフトウェア
 - 磁力線（流線、矢印など）、磁力線のポアンカレ断面図、プラズマ圧力（等値面や断面図）、ドリフト粒子軌道の実験結果など
- **対話的な操作性**
 - メニューをVR空間で選択
 - 磁力線やドリフト粒子軌道の出発点
 - 等値面の表示値
 - ポアンカレ断面の位置など
 - これらの出発点や位置の設定はVR空間内で行い、計算はすべてリアルタイム
- **Virtual-LHD[1]: CAVE型VR装置「CompleXcope」**
 - トリトン粒子の衝突点と衝突時の速度ベクトルを可視化するように拡張
- **Digital-LHD[2]: ヘッドマウント(HMDs)**
 - HMD用に最近開発された
 - Li⁺イオンの軌道表示（動画）

[1]Kageyama, A. et al., Proc. 16th ICNSP, pp. 138–142 (1998).

[2]Ohno, N. et al., PFR 19, 1401029 (2024).

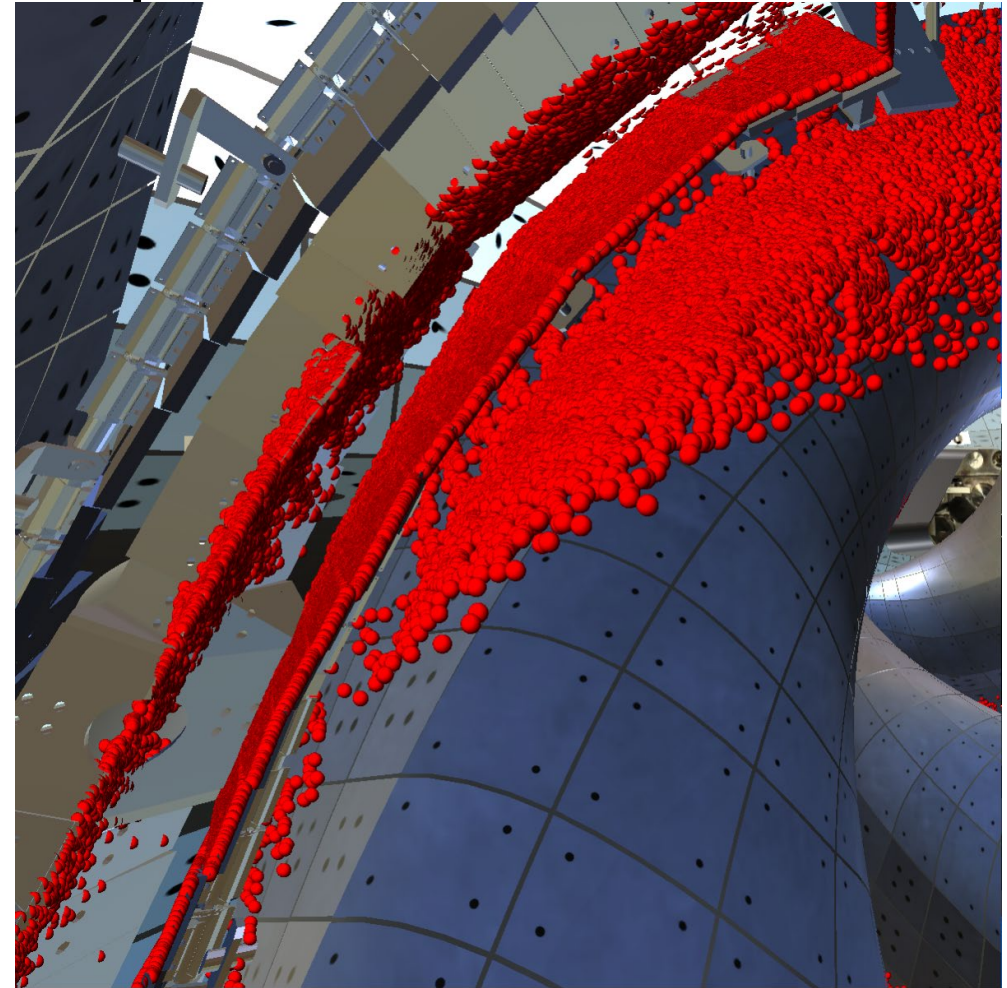
トリトン粒子とプラズマ対抗壁との 衝突点のVR可視化 (Virtual-LHD with CompleXcope)

H.Ohtani et al: JASSE accepted.



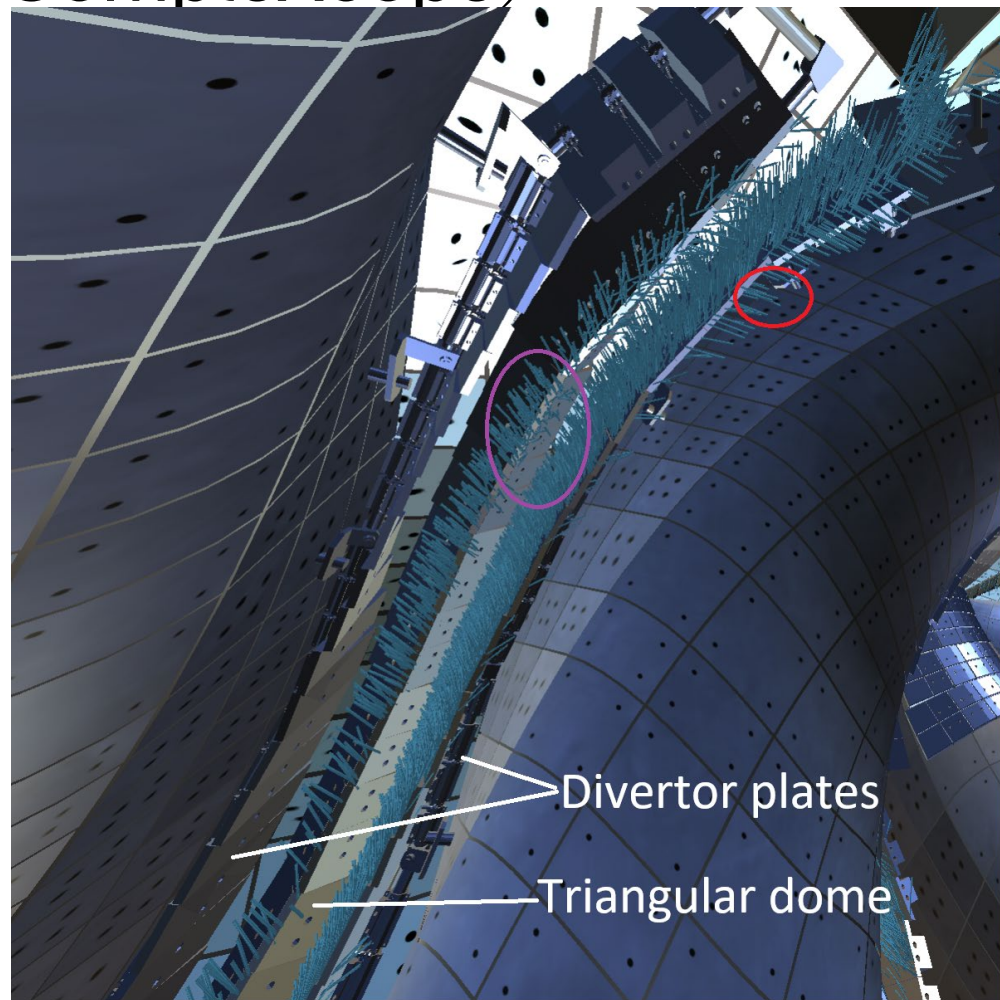
CompleXcope

このVR可視化を使って、LHD重水素実験での
サンプル試料設置場所を決定.



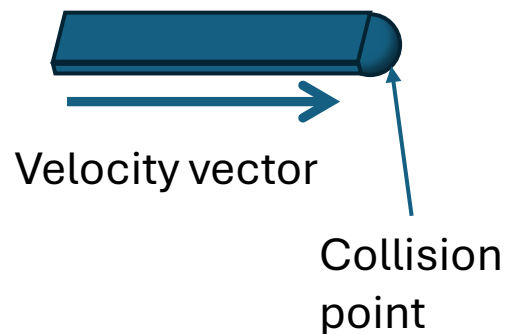
トリトン粒子とプラズマ対抗壁との 衝突点のVR可視化（速度ベクトル） （Virtual-LHD with CompleXcope）

H.Ohtani et al: submitted to NF.



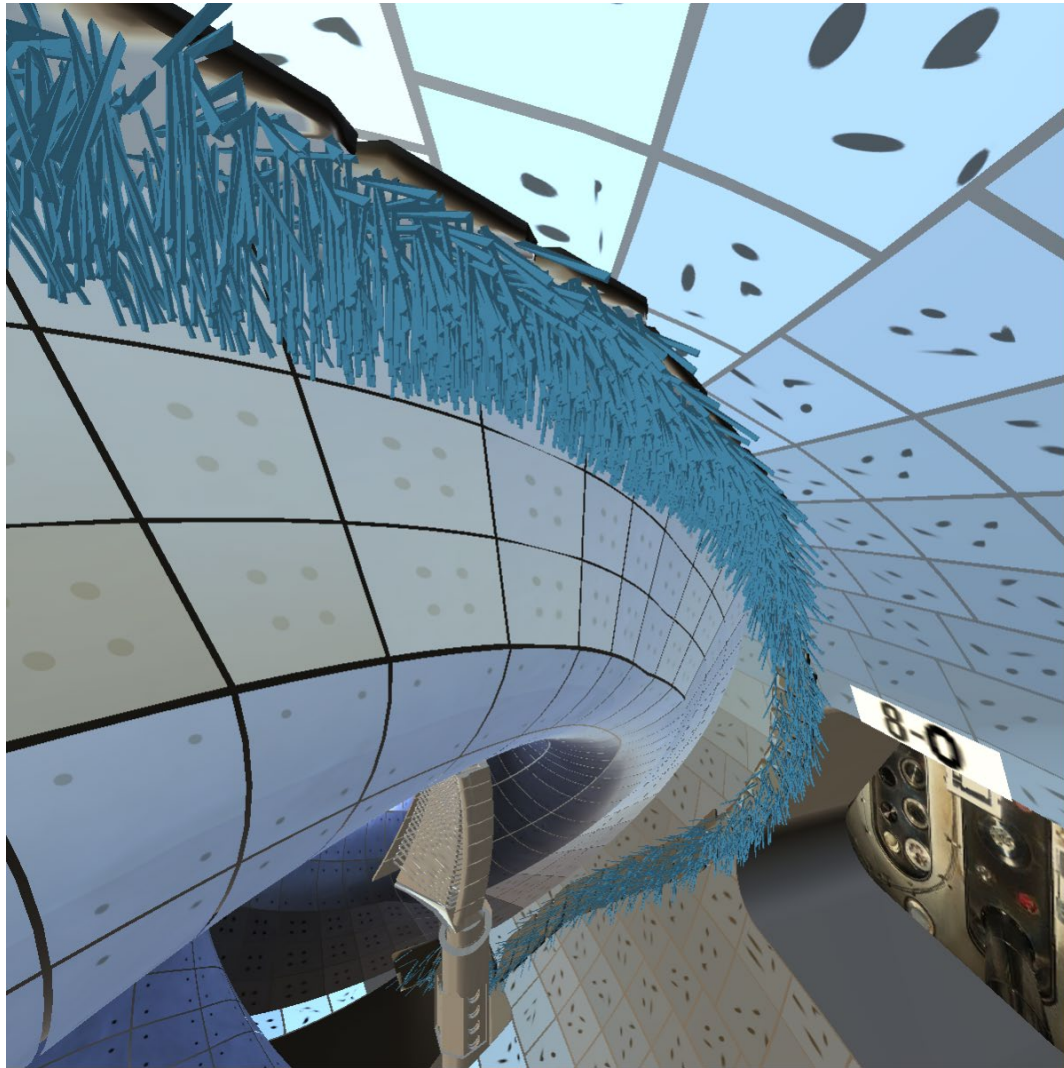
ほとんどのトリトンがダイバータ板の表面に衝突（粒子は左から飛来。紫の円）、いくつかの粒子がダイバータ板の裏側に衝突（赤色の円）。

閉構造ダイバータの三角ドームの中央頂点に集中して衝突

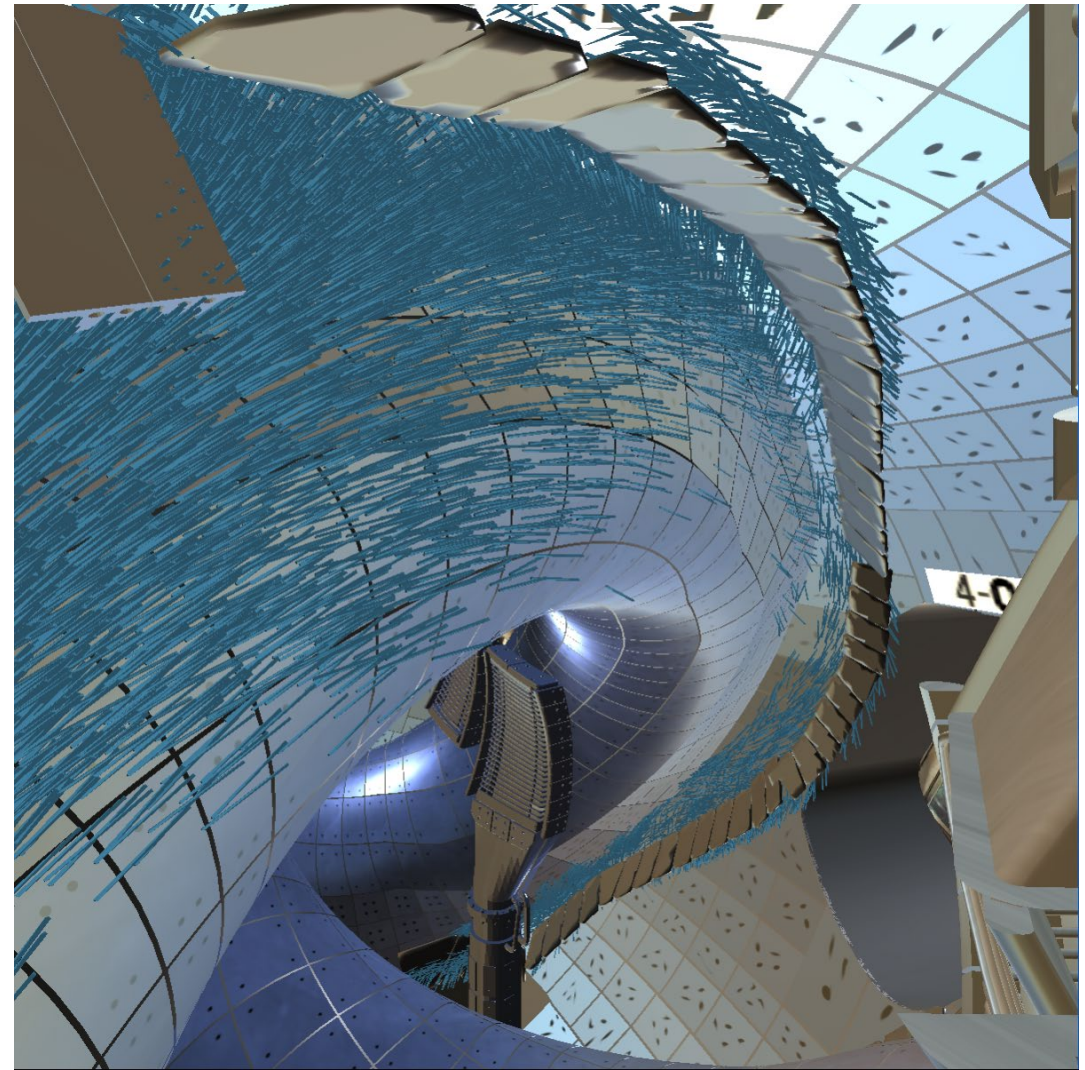


- 衝突点を球で表し、速度ベクトルを三角柱で表現
- この衝突点分布は、LHDのプラズマ対抗壁におけるトリチウム残留量の研究で観察された分布の傾向と一致している。

- 開構造ダイバータ板への衝突



- 真空容器壁への衝突



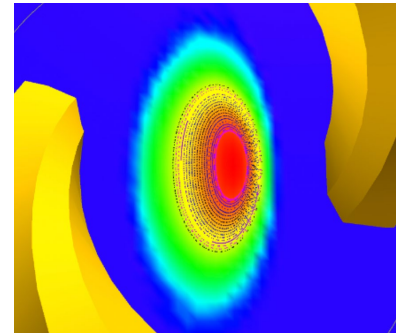
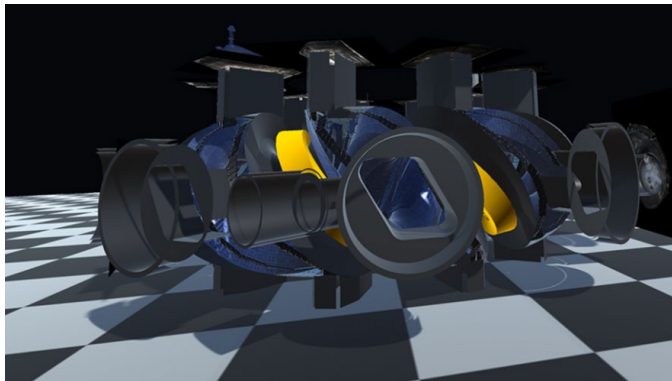
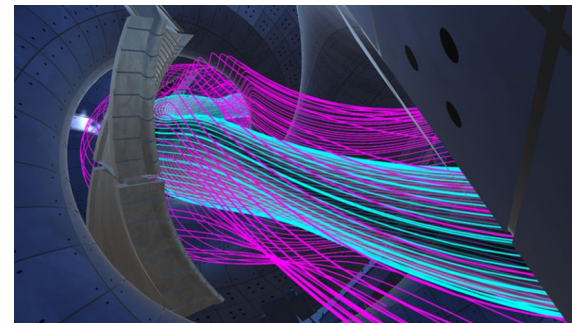
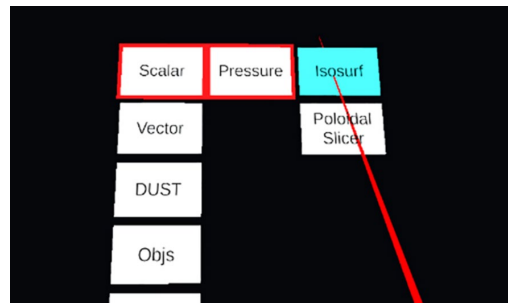
- ダイバータ板には様々な衝突角度で衝突。
- 真空容器壁にも衝突。開構造ダイバータ板の裏側にある容器壁にも衝突。

H.Ohtani et al: submitted to NF.

Digital-LHD: for HMDs

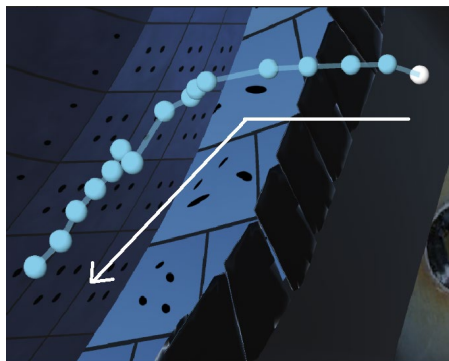
• N. Ohno et al.: PFR, Vol.19, 1401029 (2024)

- プラズマ圧力の等値面やポロイダル断面でのカラーマップ
- 磁場（ベクトル場）の矢印や流線による表示
- 3次元音響とともにドリフト粒子軌道の表示
- ダスト粒子の実験データ

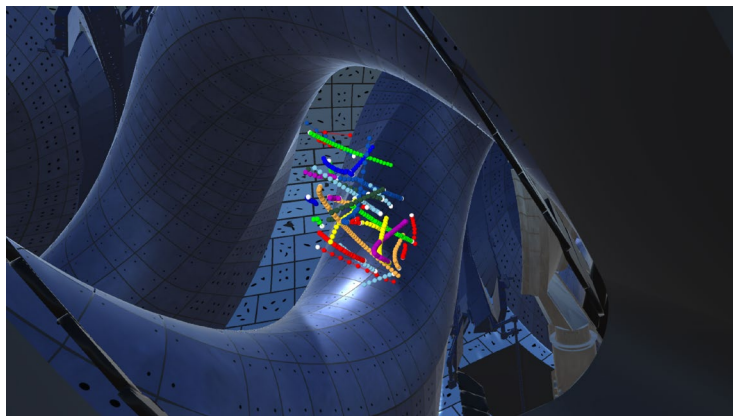


• ダスト粒子軌道のVR可視化

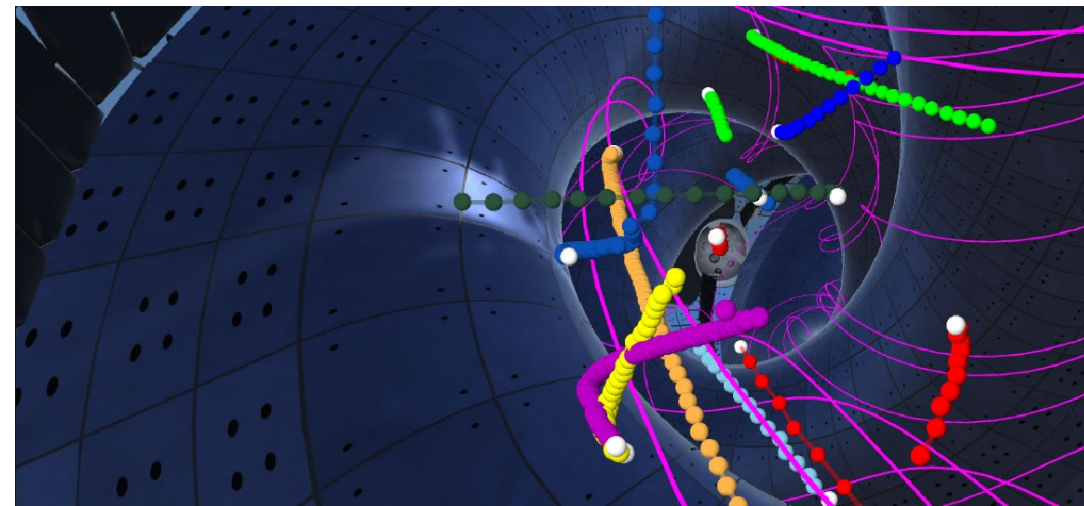
N.Ohno et al: PFR, Vol.19, 1401029 (2024)



3D time-series trajectory of single dust particle



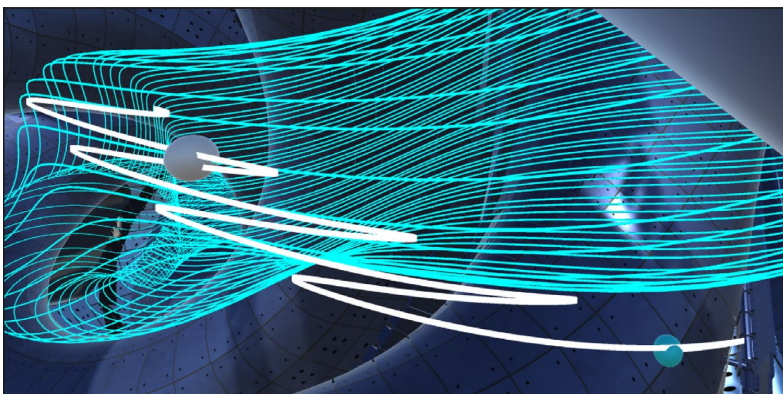
View from outer port



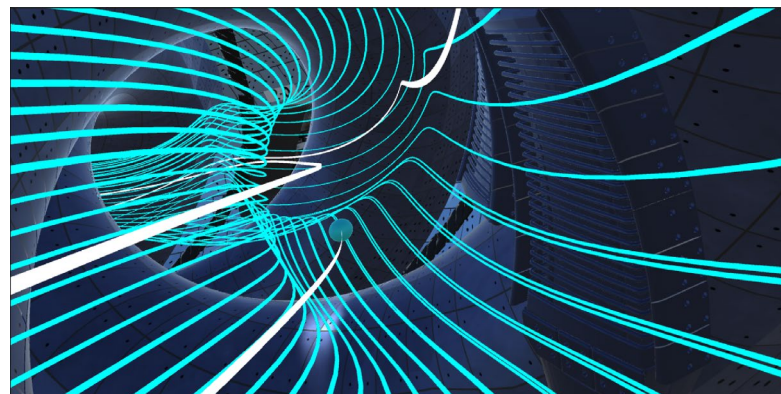
3D trajectories of dust particles with magnetic field lines

• プラズマ粒子軌道のリアルタイム可視化

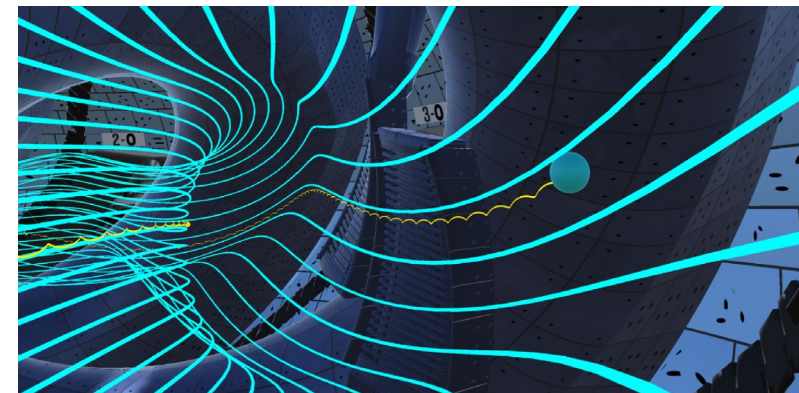
H.Ohtani et al: submitted to NF.



Bouncing motion of drift particle

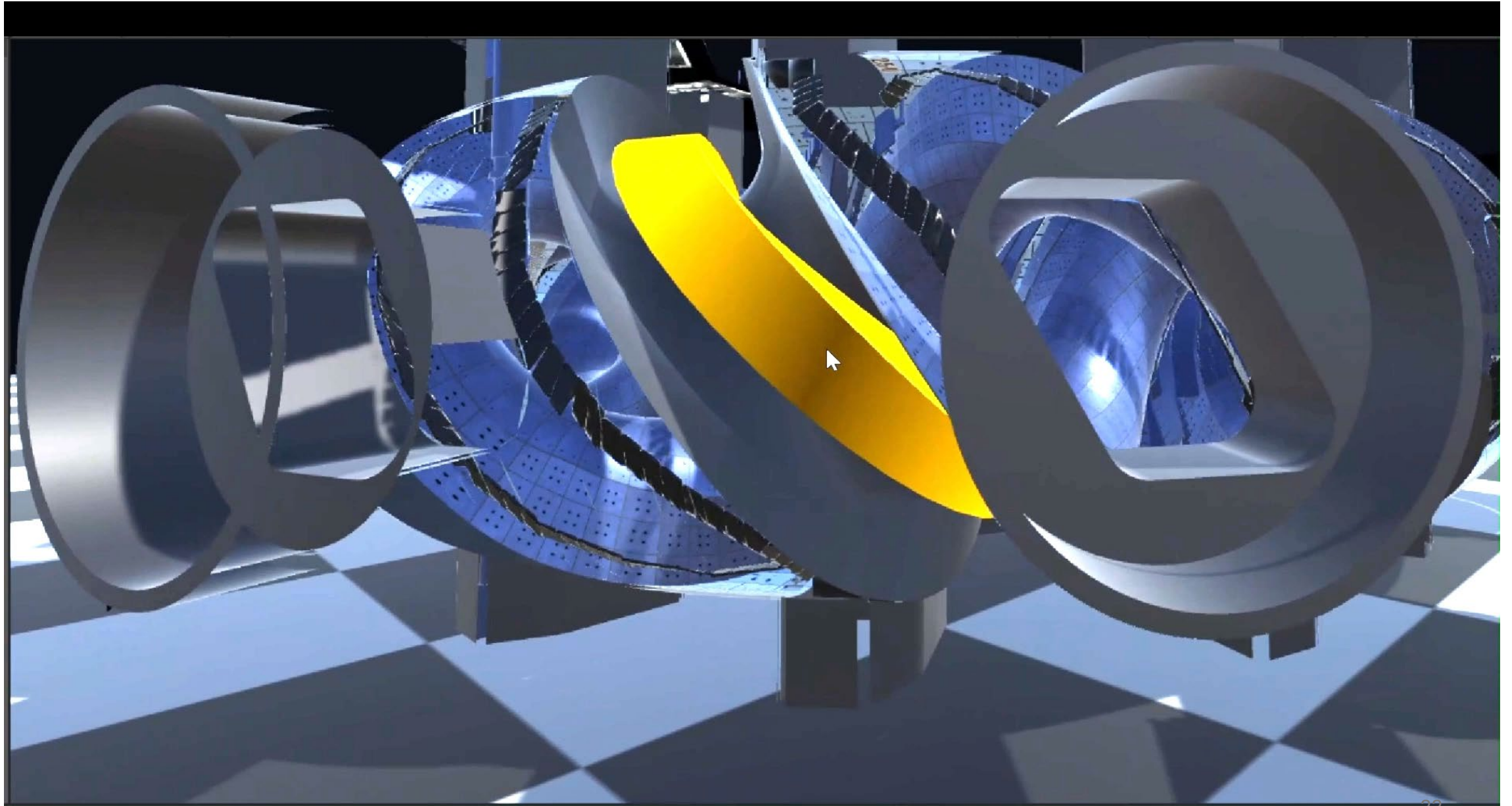


Passing motion of drift particle



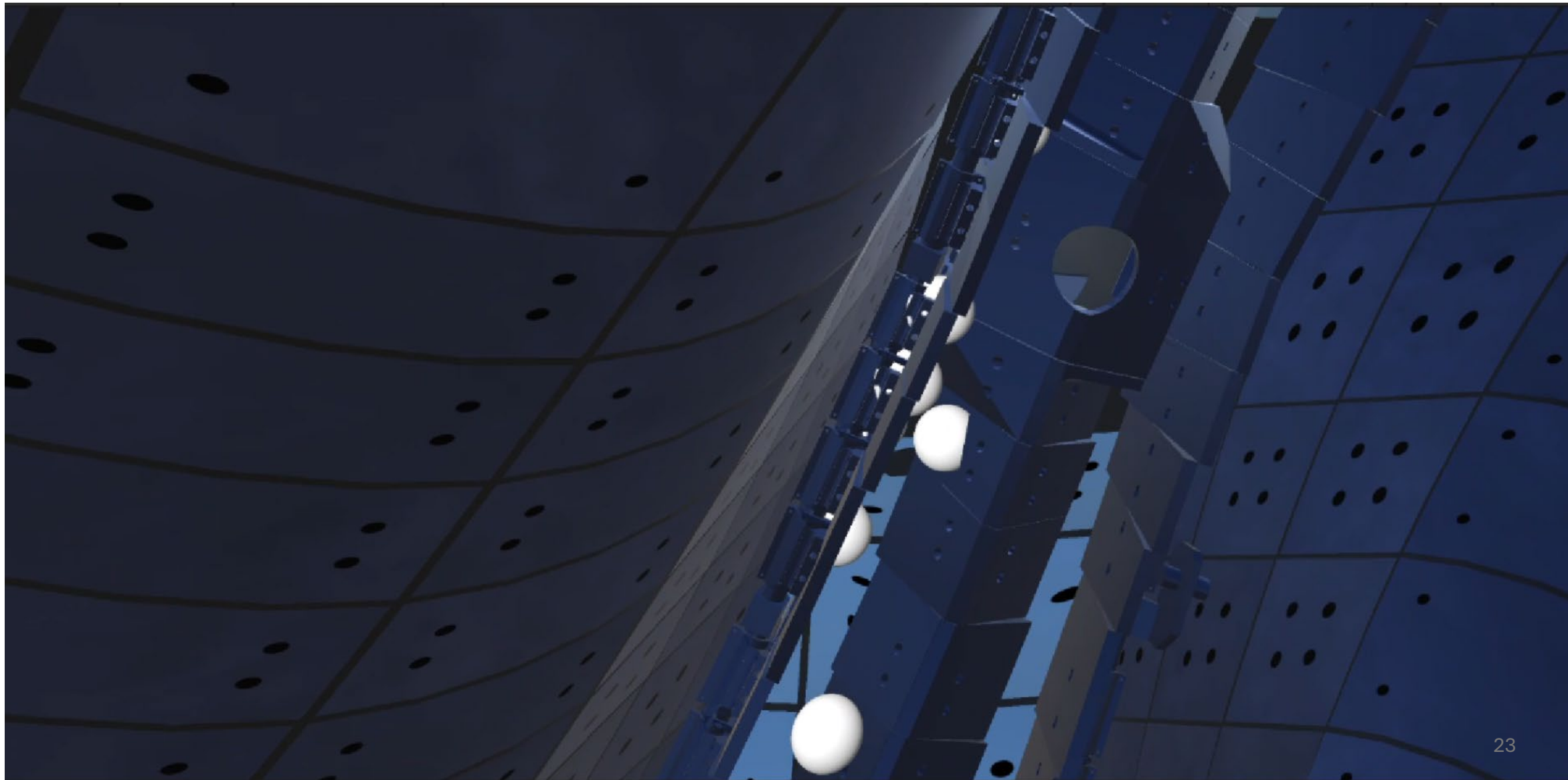
Passing motion of particle, including the gyration motion

Impurity powder dropperからLiを投下する。 Orbits of Li^+ ion calculated by Dr.M.Shoji
H.Ohtani et al: submitted to NF.



ダイバータ板との衝突

H.Ohtani et al: submitted to NF.

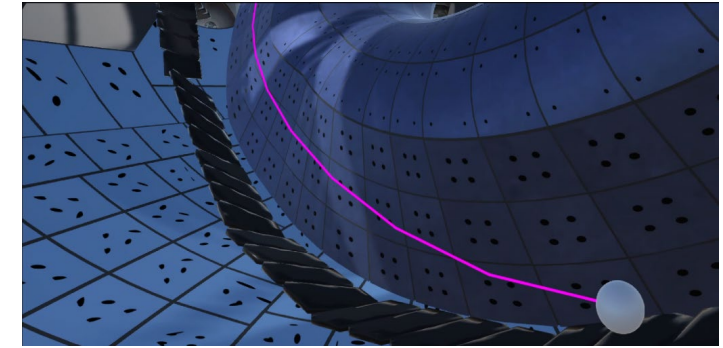


VR可視化解析の今後の可能性について

H.Ohtani et al: submitted to NF.

• Virtual-LHDおよびDigital-LHDの重要な機能

- 磁力線流線やドリフト粒子軌道をリアルタイムで計算・表示。出発点はVR空間の計算領域内であればどこでも。
 - 粒子軌道については時間をさかのぼって時間積分も開発可能
 - 第一壁を破壊した粒子の軌道や磁力線をさかのぼって解析可能



• 炉設計や制御への貢献

- ダイバータ板以外の第一壁やダイバータ板の裏側に粒子が衝突
- 機械学習を使って、磁場構造と衝突点分布の関係をモデル化
 - 異なるプラズマ条件下での衝突点分布を予測
 - プラズマ実験や炉設計へ貢献

• ASTI制御されたプラズマ実験のリアルタイムVR可視化

- ASTI制御されたプラズマの計算結果をリアルタイムでVR可視化
 - リアルタイム制御と解析とをVRを通じた統合フレームワーク構築

まとめ

•VR可視化解析

•CHSのデジタルアーカイブ

- フォトグラメトリとレーザースキャンでCHSの3Dモデルを作成
- レーザースキャンによるデータは正確な位置情報を持つため、CADデータとの重畳が可能で、干渉のチェックができる。

• Virtual-LHDの拡張: 没入型VR装置を使った可視化

- トリトンとプラズマ対抗壁との衝突 → 速度ベクトルの可視化で衝突の様子が明確化
- ダイバータ板の裏側に衝突する粒子
- LHDプラズマ対抗壁中のトリチウム残留量の研究に貢献

• Digital-LHDの開発: HMDを使った可視化

- プラズマ圧力面、磁力線、荷電粒子軌道、ダスト粒子の実験データ
- Liパウダーの添加実験に対する軌道計算結果のVR可視化

• VR可視化解析は具体的なデータ解析とプラズマ物理の理解に役立つ道具

- 没入型VR装置による可視化解析は直感的な理解を促進
- 核融合プラズマ・プラズマ物理に新しい気付きを与える道具

まとめ

•VR可視化解析の今後の可能性について（VR可視化解析の重要な特徴）

- VRの特徴である対話性をフル活用すること
- 観測者が様々視点や視線方向で観測することはもちろん
- VR空間中で観測者が好きな個所に、例えば磁力線の出発点を置いて、リアルタイムで計算結果を観測することができる。
- シミュレーションデータと実験データの両方を、単なる受動的な閲覧にとどまらず、**能動的に探索・解析**できる