



# 磁場

Yuji Hirono

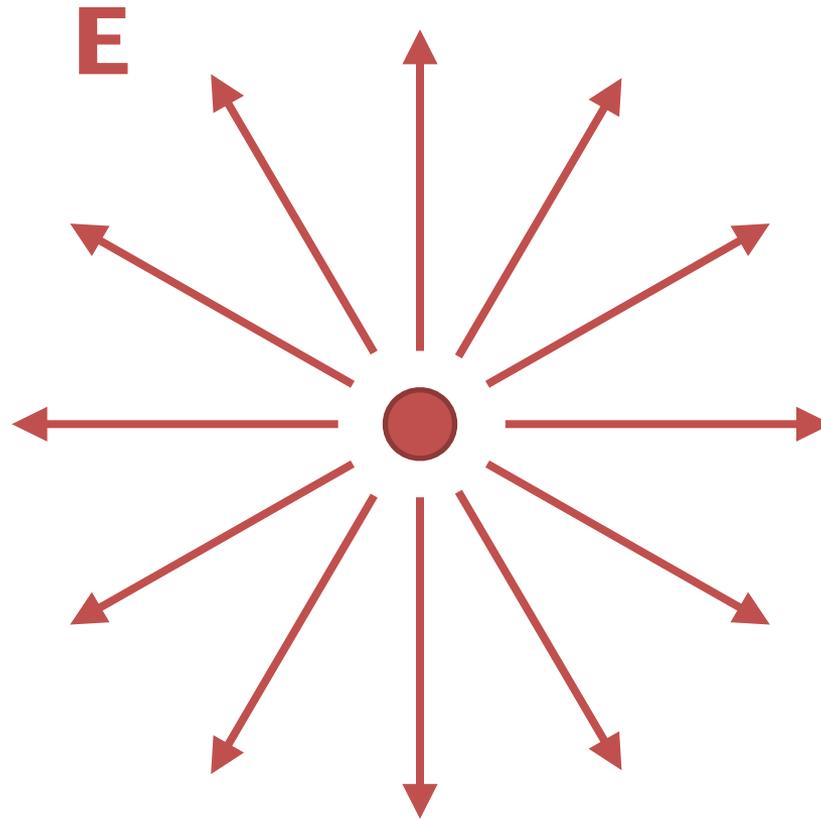
apctp

Asia pacific center for theoretical physics

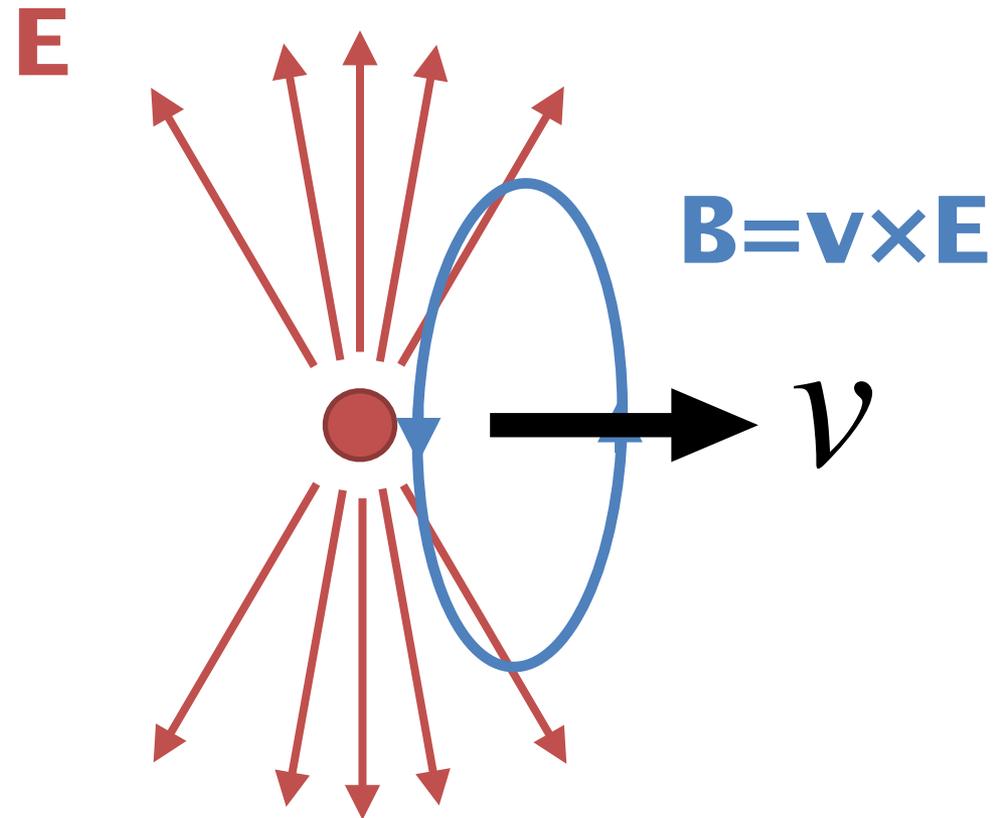
# 話すこと

- 重イオン衝突実験における**磁場**
  - **磁場の起源**
  - **磁場のその後**
  - **磁場の影響は？**

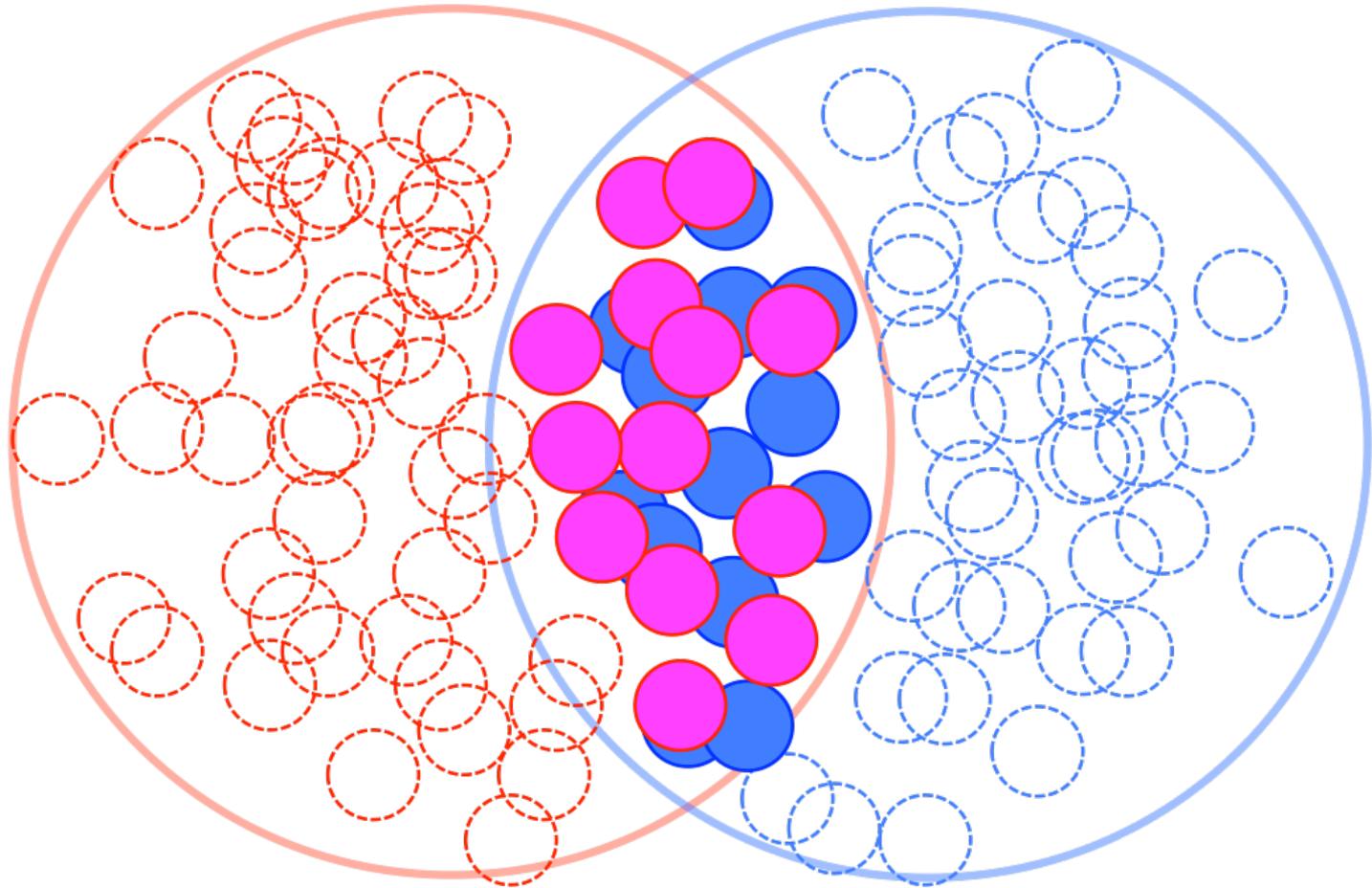
# 荷電粒子の作る電磁場



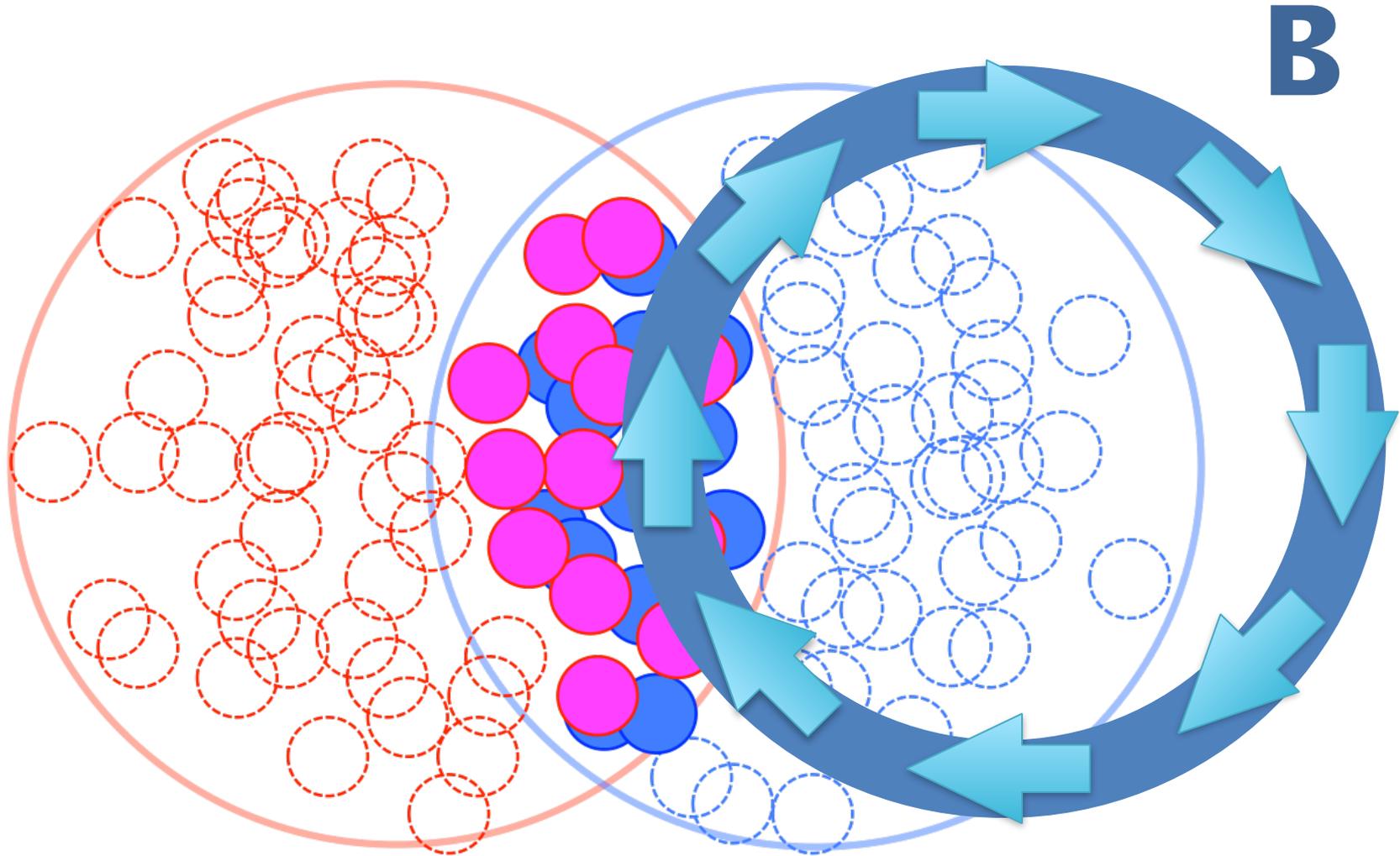
# 荷電粒子の作る電磁場



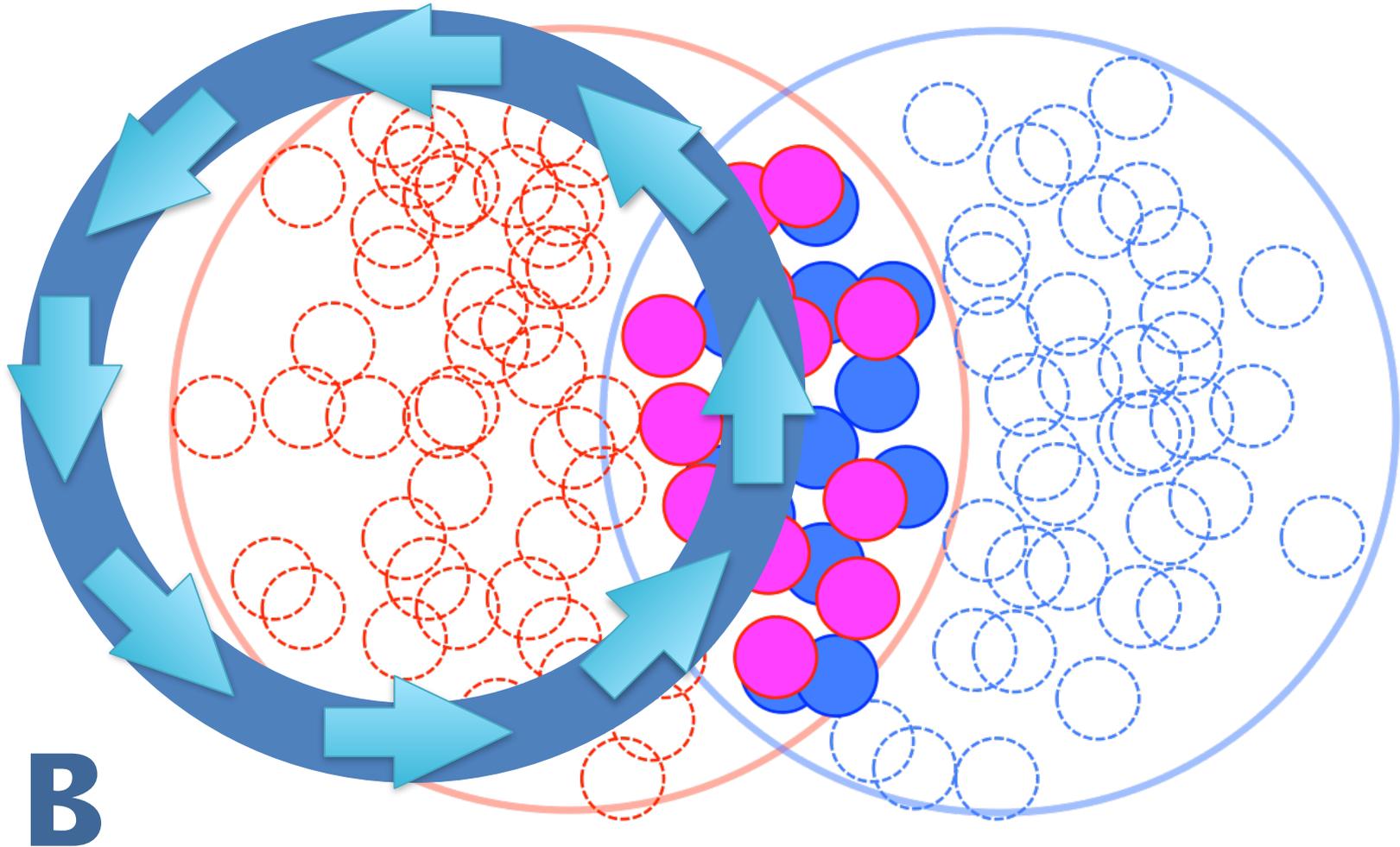
# 磁場の起源: 陽子の電荷



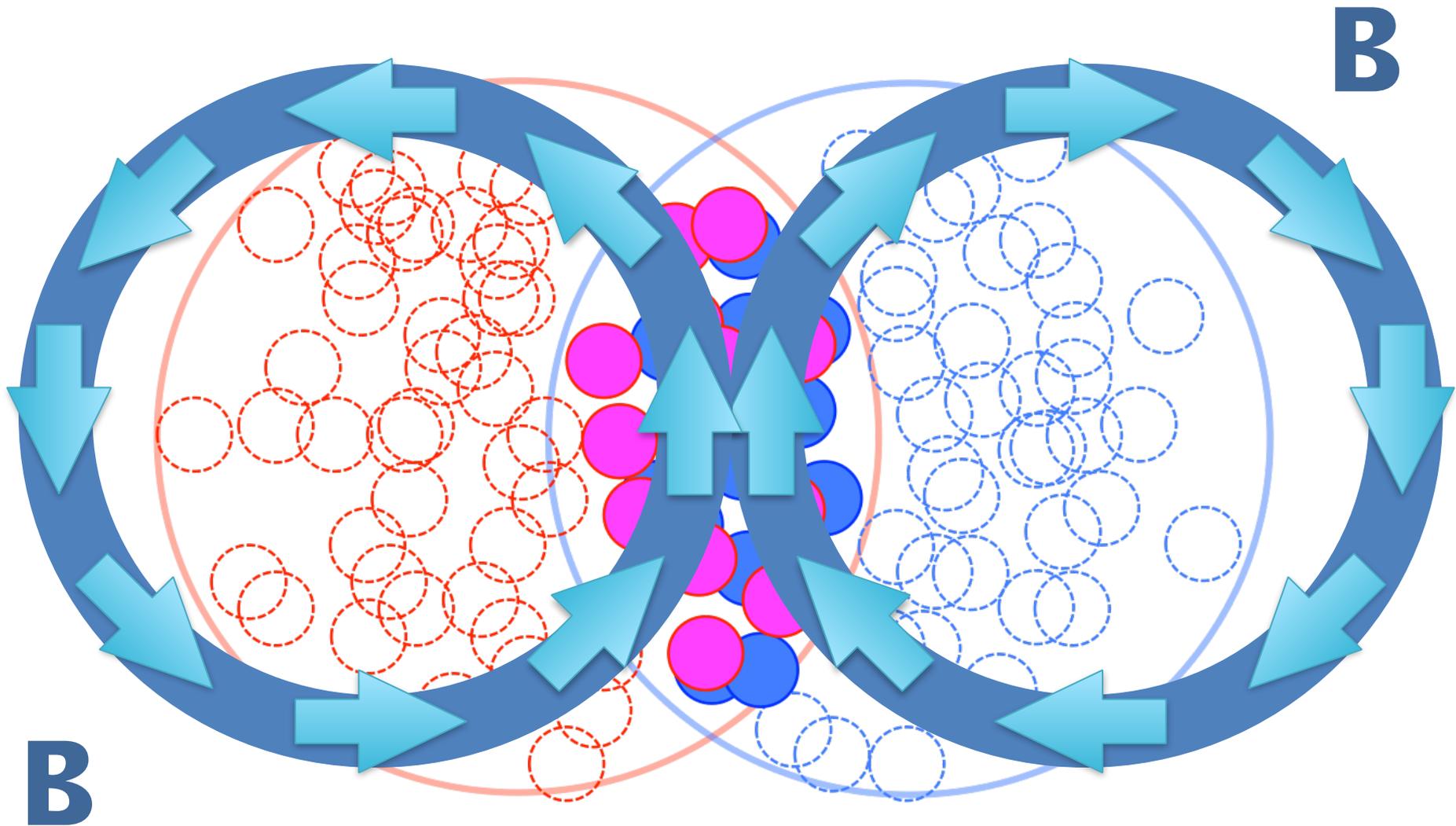
# 磁場の起源: 陽子の電荷



# 磁場の起源: 陽子の電荷



# 磁場の起源: 陽子の電荷



# 磁場の起源: 陽子の電荷

- 周辺衝突で発生
- 空間的に不均一

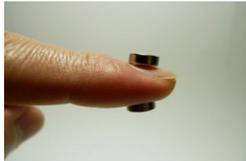


# 磁場の強さ比較



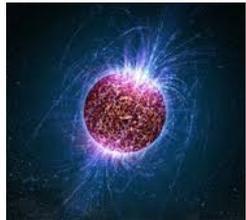
地磁気

$$0.6 \times 10^{-4} \text{ T}$$



ネオジム磁石

$$0.5 \text{ T}$$

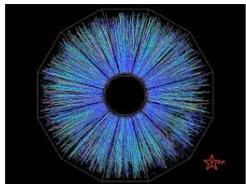


中性子星

$$10^9 \text{ T}$$

マグネター

$$10^{11} \text{ T}$$



重イオン衝突

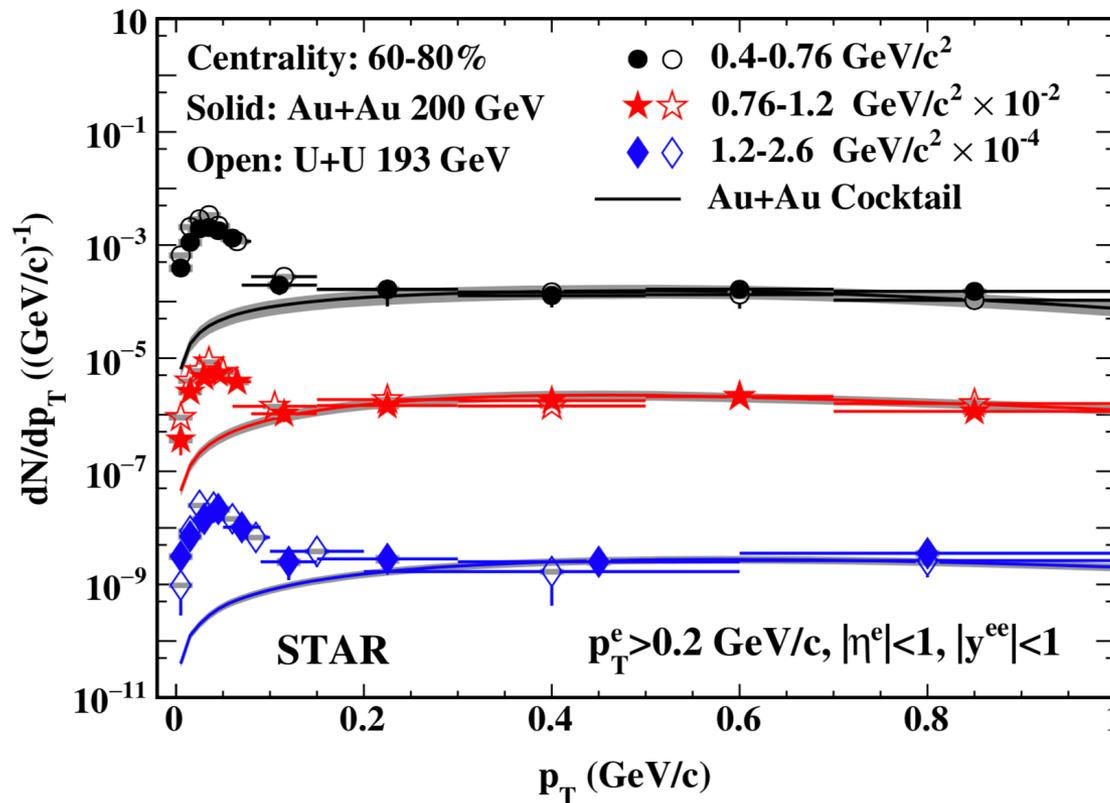
$$10^{13-14} \text{ T}$$

# 初期磁場の実験的検出?

[STAR PRL121, 132301 (2018)]

[ALICE PRL121, 212301(2018)]

- 周辺衝突での $e+e^-$ にenhancement (at low  $p_T$ )
- photon-photon衝突由来の $e+e^-$ を考えると数は合う

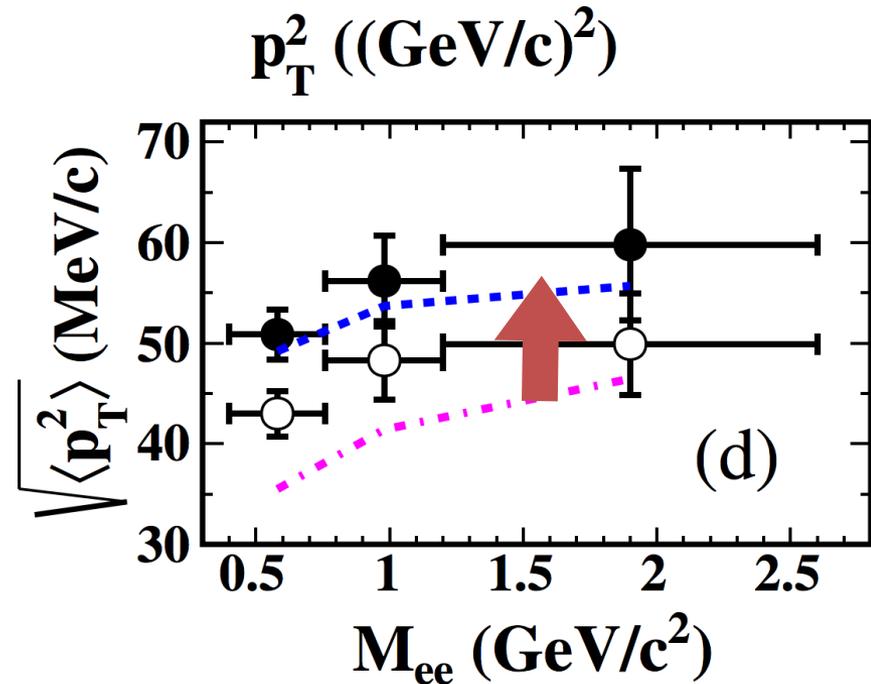
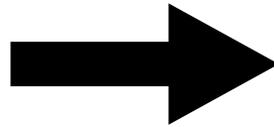
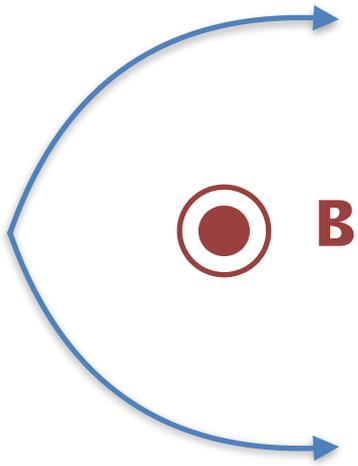


# 初期磁場の実験的検出?

[STAR PRL121, 132301 (2018)]

[ALICE PRL121, 212301(2018)]

- photon-photon衝突で数は合うが、  
ptの分散をunderestimateする -> 磁場の効果



$$B\tau \sim 10^{14} \text{T} \times 1 \text{ fm}$$

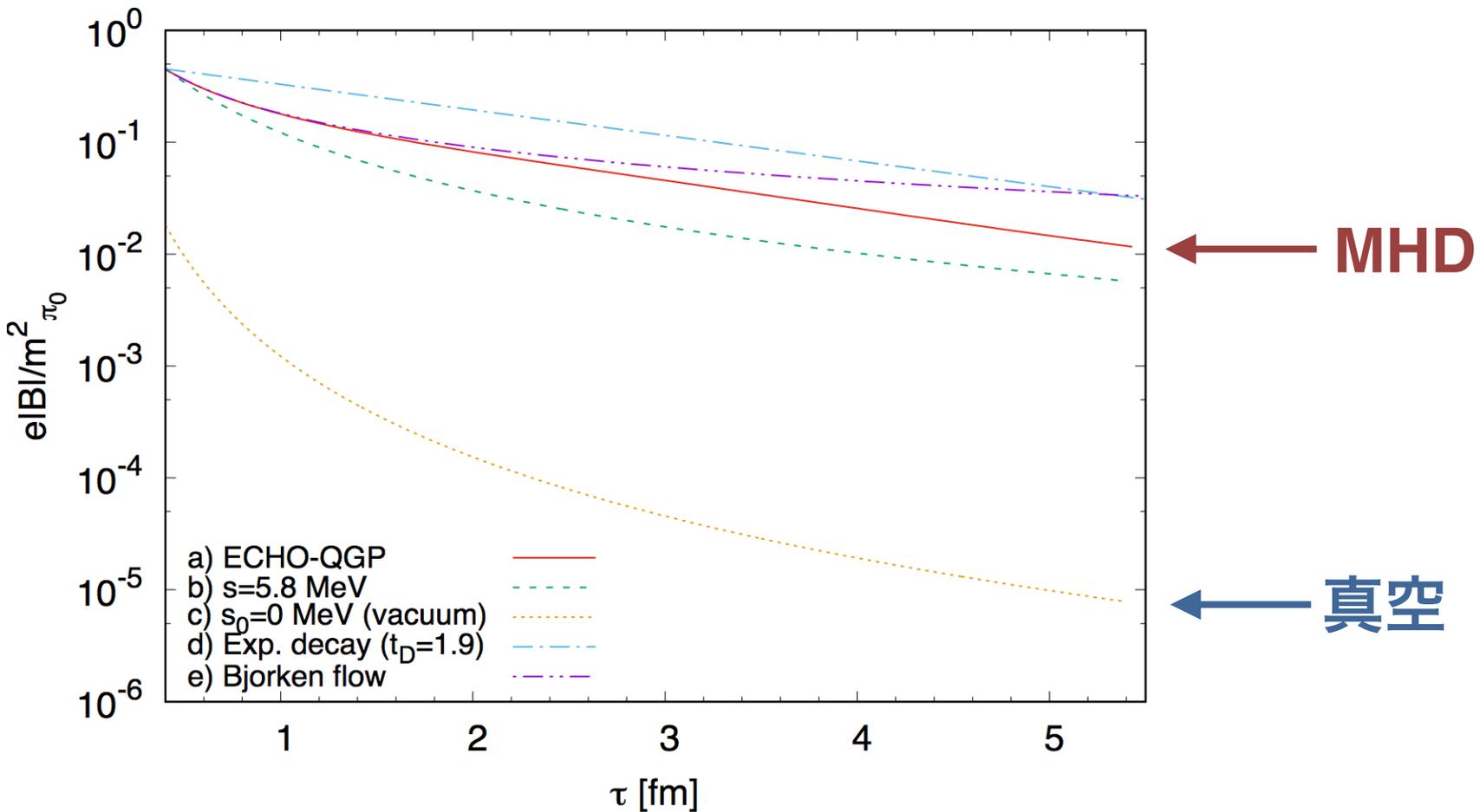
# 磁場のその後

- 物質の性質に依る
- 荷電粒子(quark/antiquark)の生成
  - 電気を流すように
- “Lenzの法則”
  - 急速に広がって弱くなる磁場を伝導物質がとどめようとする

# 磁場の時間発展の例

- Magnetohydrodynamics (MHD)

“ECHO-QGP” [Inghirami et. al. EPJC'16]



電磁場



伝導流体

# 流体力学とは？

- 低エネルギーの物理に興味

$$T \gg \tau$$

平均自由時間

“ゆっくり”

$$L \gg \ell$$

平均自由行程

“長波長”

- **保存則**と**微分展開**に依拠した低エネルギー有効理論

# 流体力学とは？

- 自由度:
  - **保存電荷密度** 粒子数、エネルギー、運動量など

$$\{n, e, \mathbf{v} \cdots\}$$

- 南部・ゴールドストーンモード
  - “流体力学変数”
- 時間発展は保存則によって与えられる

$$\partial_t n + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

# 流体力学とは？

- “構成方程式”

$$\mathbf{j} = n\mathbf{v} - \underline{D}\nabla n + \dots$$

拡散係数

- 物質の性質は**輸送係数**に入ってる

# 保存電荷密度・NG modeが 低エネルギーで重要になる理由

- 線形揺らぎの分散関係

- 保存電荷の拡散  $\omega = -iDk^2$

- 音波  $\omega = \pm c_s k$

- NG mode  $\omega = vk$

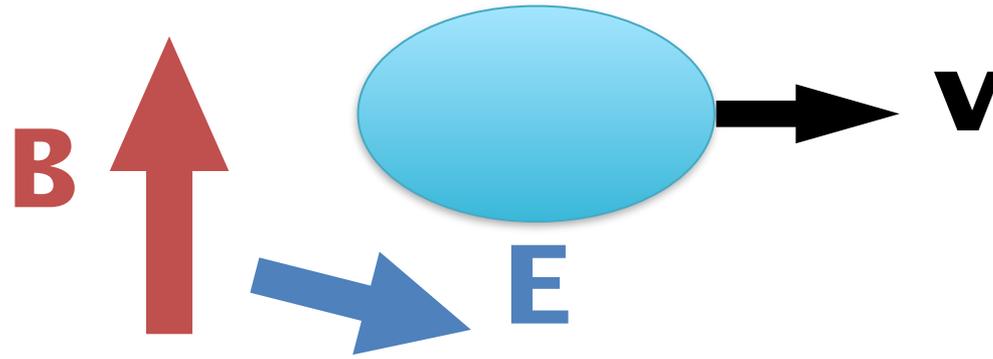
電磁場



- photonはNG mode
- 流体はエネルギー  
運動量保存

伝導流体

# 伝導流体から見る



- $\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B})$  「オームの法則」

- $\partial_\mu T_{\text{fluid}}^{\mu\nu} = F^{\nu\rho} j_\rho$  「ローレンツ力を感じる」

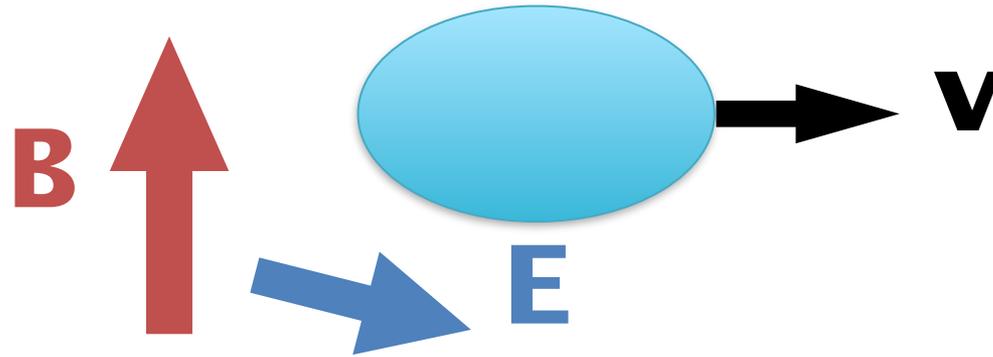
$$\partial_t \mathbf{v}_\perp = \frac{1}{e + p} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = -\frac{\sigma B^2}{e + p} (\mathbf{v}_\perp - \bar{\mathbf{v}}_\perp) \equiv -\frac{1}{\tau_v} (\mathbf{v}_\perp - \bar{\mathbf{v}}_\perp)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_\perp \equiv \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$$

横方向流速は“massive”に

$$\omega = -i/\tau_v$$

# 電磁場から見る



- $\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B})$  「オームの法則」
- $\partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu$  「...(アンペール・マクスウェルの法則)」

$$\partial_t \mathbf{E} = -\mathbf{j} + \nabla \times \mathbf{B} = -\sigma(\mathbf{E} - \bar{\mathbf{E}}) + \nabla \times \mathbf{B}$$

$$\bar{\mathbf{E}} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \text{電場も“massive”に}$$

- $\tau_E = \frac{1}{\sigma}$  より後、電場は  $\mathbf{v}$  &  $\mathbf{B}$  により決まる

# 2つの時間スケール

$$\tau_v = \frac{e + p}{\sigma B^2} \quad \tau_E = \frac{1}{\sigma}$$

- $\tau < \tau_E$  **Maxwell的**

流速・電場・磁場のダイナミクス

$\tau_v$ より後、 $\mathbf{v}_\perp$ は独立な流体変数ではない(電磁場で決まる)

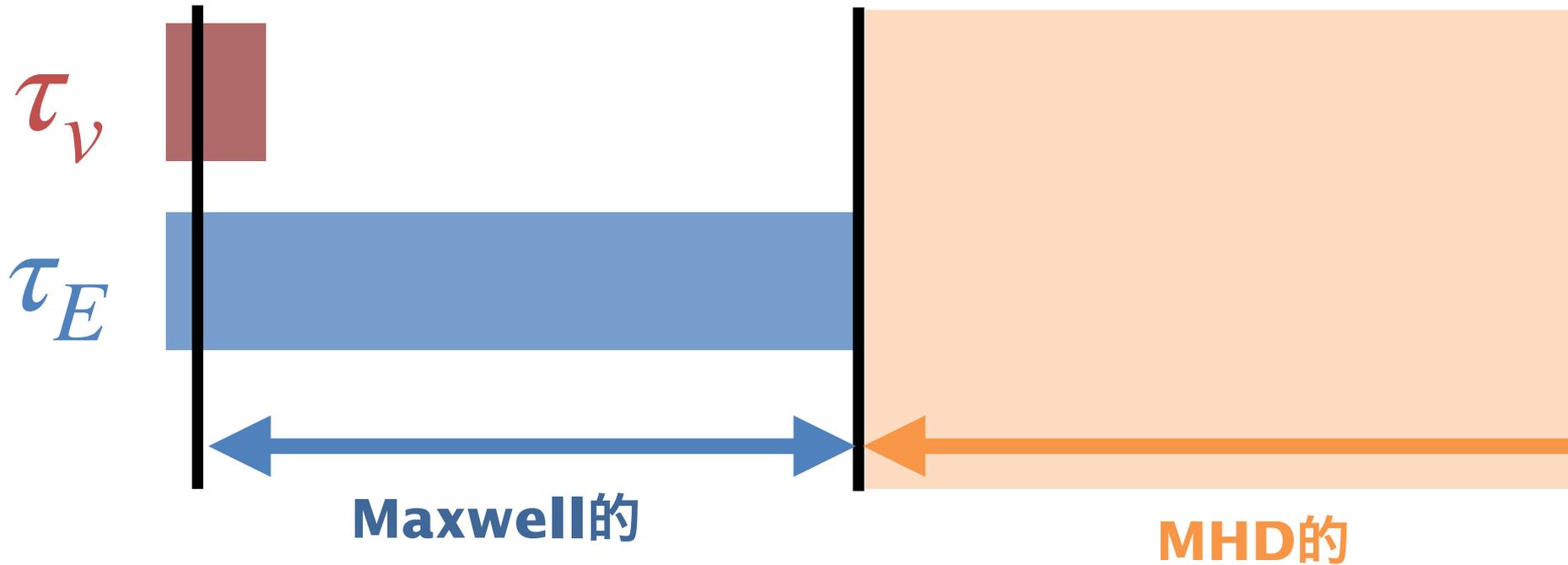
自由度:  $\{T, \mathbf{v}_\parallel, (\mathbf{v}_\perp), \mathbf{E}, \mathbf{B}\}$

- $\tau > \tau_E$  **MHD的**

$\mathbf{E}$  &  $\mathbf{n}$ は独立な流体変数ではない

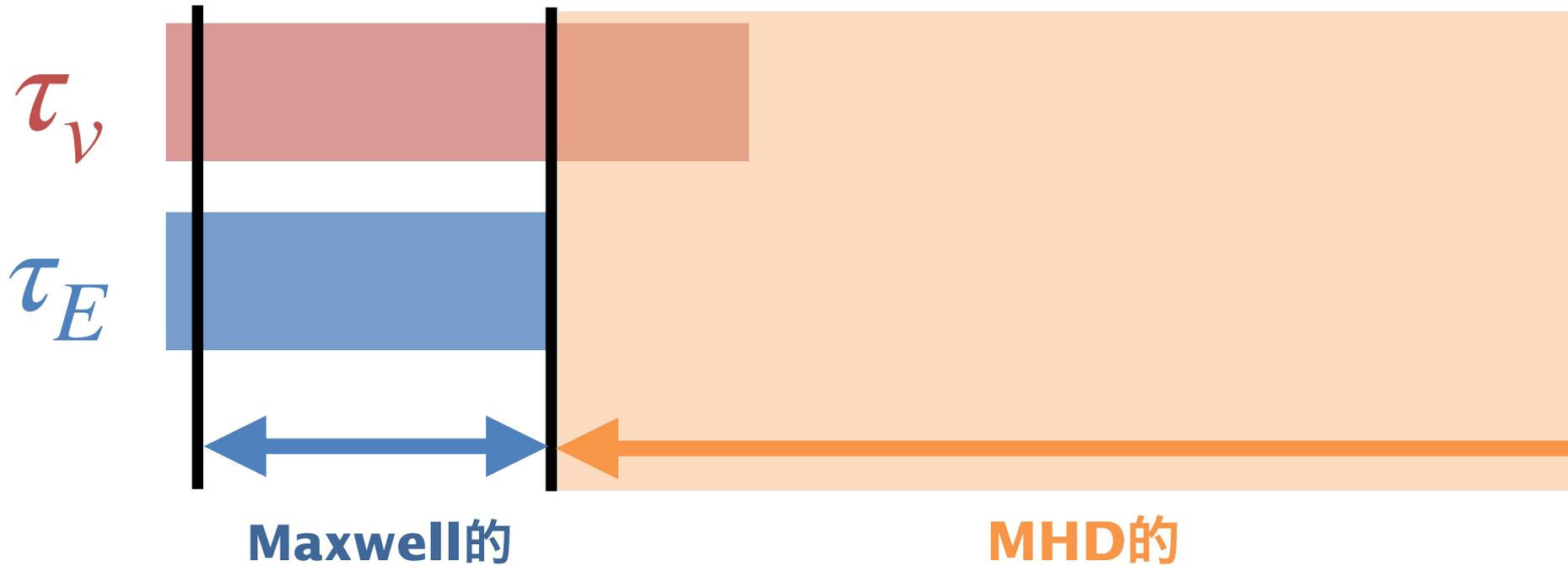
自由度:  $\{T, \mathbf{v}, \mathbf{B}\}$

# 2つの時間スケール



$B^2 > e + p$  の場合

# 2つの時間スケール



$B^2 < e + p$  の場合

# Magnetohydrodynamics (MHD)

- 流体力学変数  $\{e(x), u^\mu(x), B^\mu(x)\}$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$E^\mu \equiv F^{\mu\nu} u_\nu, \quad B^\mu \equiv \tilde{F}^{\mu\nu} u_\nu \quad \tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\rho\sigma}$$

- 運動方程式

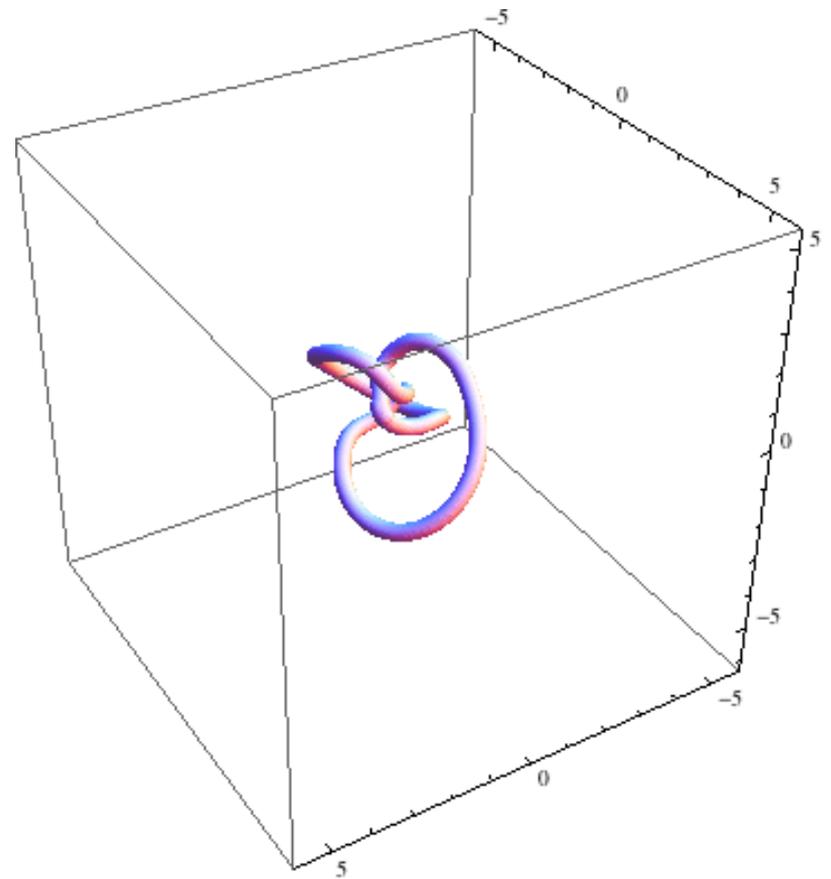
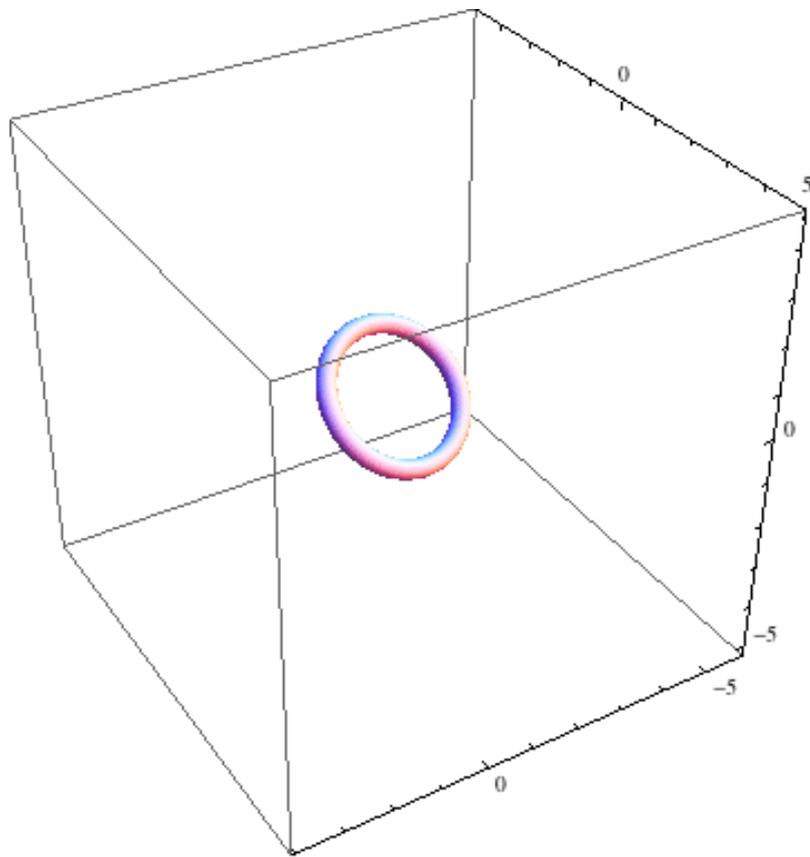
$$\partial_\mu T_{\text{tot}}^{\mu\nu} = 0 \quad \partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0$$

# 磁氣的U(1) 1-form対称性

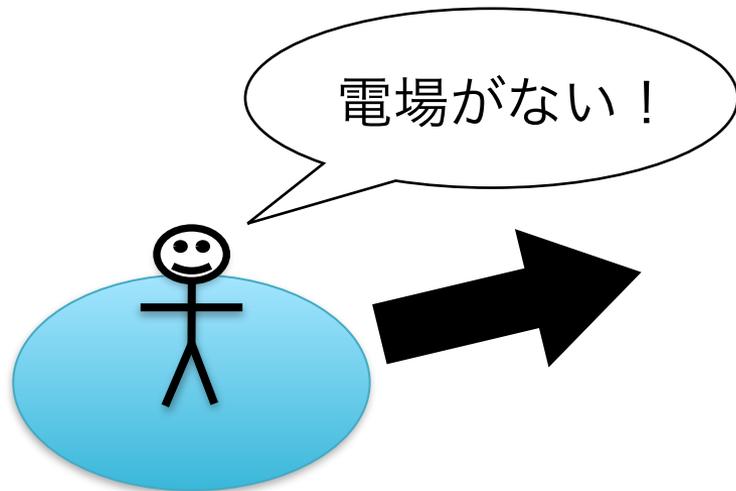
$$\partial_{\mu} \tilde{F}^{\mu\nu} = 0$$

- この対称性に伴うネーター電荷の保存則  
閉曲面を貫く磁束の保存 (monopoleがない)
- 電氣的U(1) 1-form対称性は荷電粒子の存在  
により陽に破れている:  $\partial_{\mu} F^{\mu\nu} = j^{\nu}$

# 磁力線は切れない



理想MHD: 流体に乗って移動してる人は電場を感じない



$$E_{(0)}^{\mu} = 0$$

Lab frameの量で書くと

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$$

電気伝導度が大きい場合に対応

# 理想MHDの構成方程式

$$T_{\text{tot}(0)}^{\mu\nu} = (e + p + \mathbf{B}^2)u^\mu u^\nu - \eta^{\mu\nu} \left( p + \frac{1}{2}\mathbf{B}^2 \right) - \mathbf{B}^2 b^\mu b^\nu$$

$$B^\mu = |\mathbf{B}|b^\mu \quad b_\mu b^\mu = -1$$

$$F_{(0)}^{\mu\nu} = \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} u_\rho B_\sigma$$

# 磁場が及ぼす力

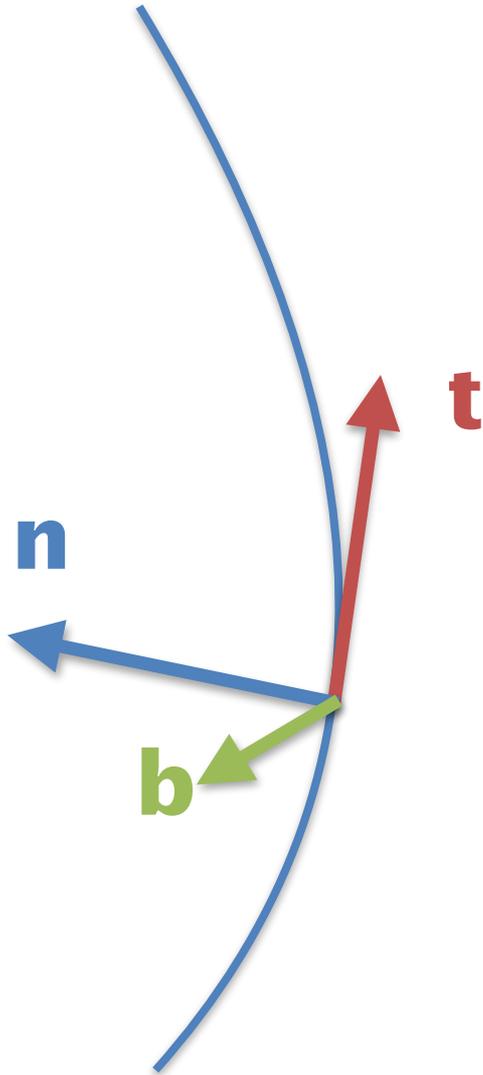
応力テンソル

$$T_{ij} = B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}$$

力は  $\partial_i T_{ij}$

$$\mathbf{F} = B^2 \kappa \mathbf{n} - \nabla_{\perp} \frac{1}{2} B^2$$

$\mathcal{K}$  : 磁力線の曲率



# 磁場が及ぼす力

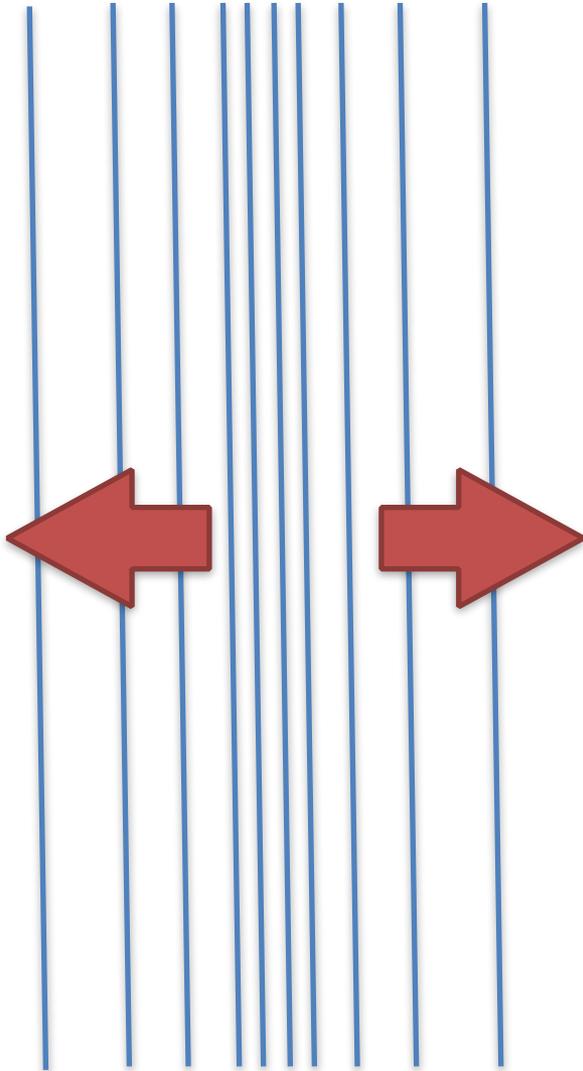
応力テンソル

$$T_{ij} = B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}$$

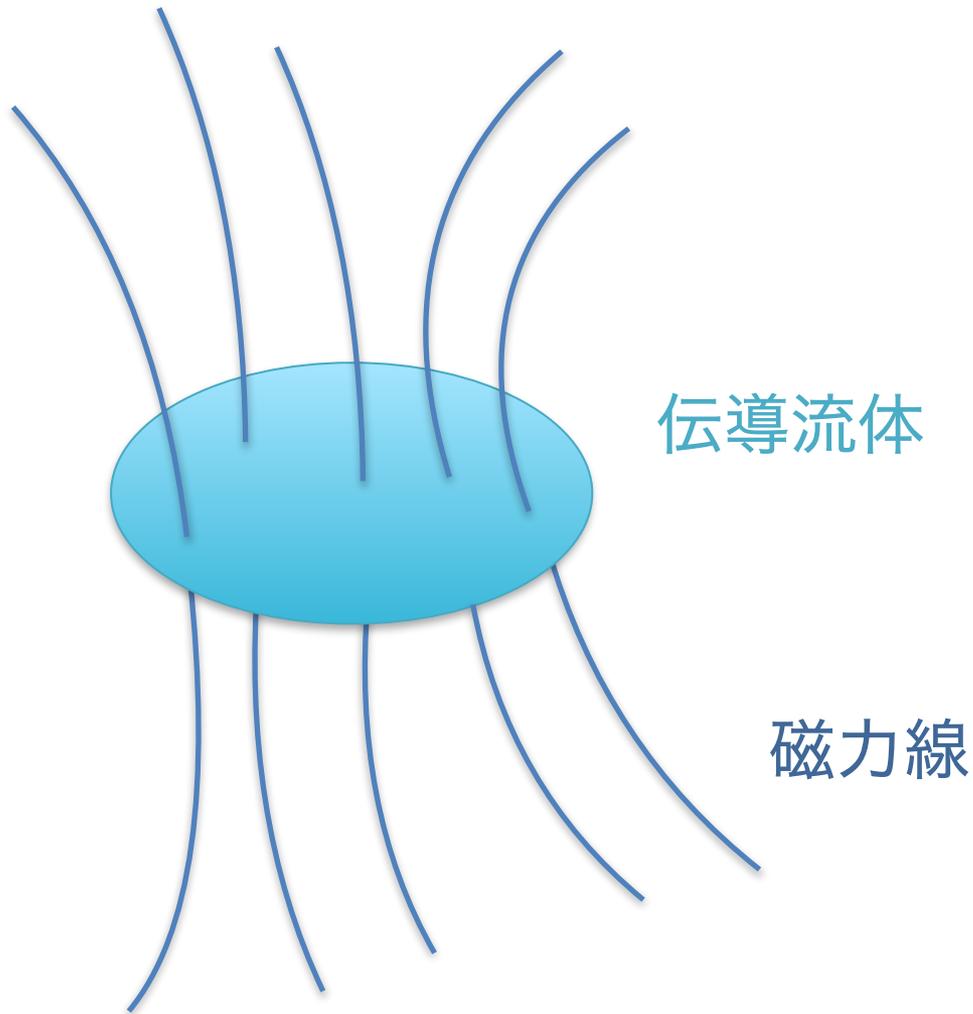
力は  $\partial_i T_{ij}$

$$\mathbf{F} = B^2 \kappa \mathbf{n} - \nabla_{\perp} \frac{1}{2} B^2$$

$\mathcal{K}$  : 磁力線の曲率



# “磁力線の凍りつき”



# MHDにおける波

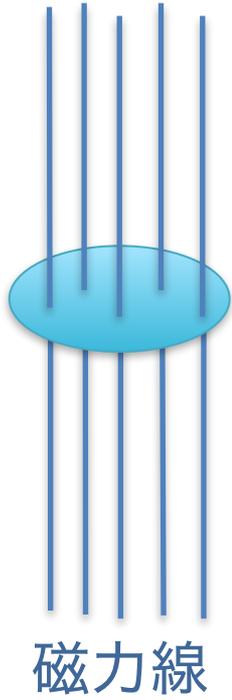
- 線形揺らぎを考える

$$e \rightarrow e + \delta e$$

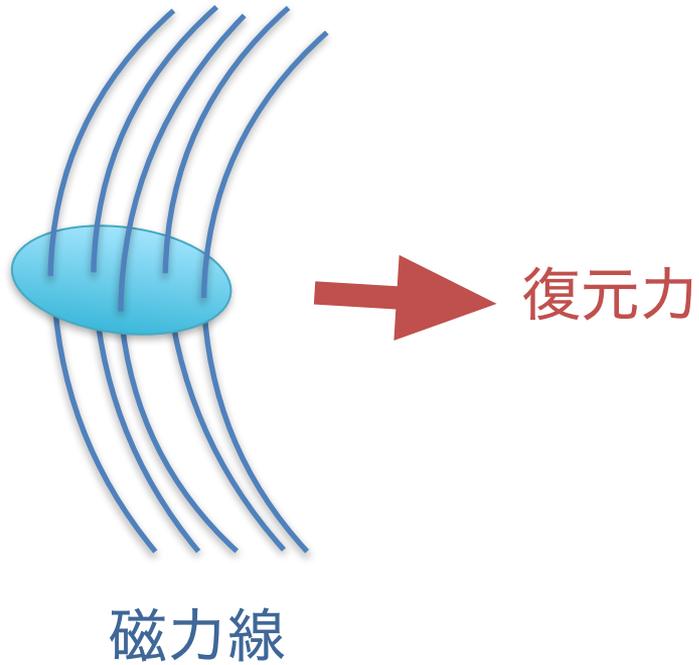
$$u^\mu \rightarrow u^\mu + \delta u^\mu$$

$$B^\mu \rightarrow B^\mu + \delta B^\mu$$

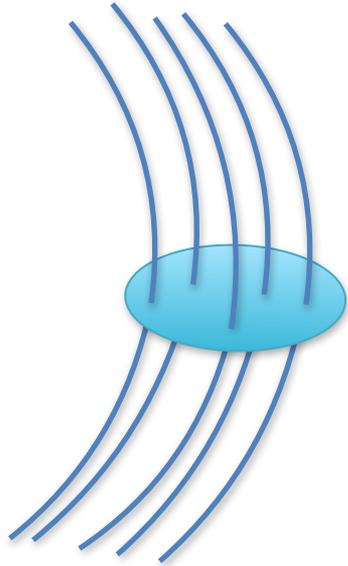
# アルフベン波



# アルフベン波

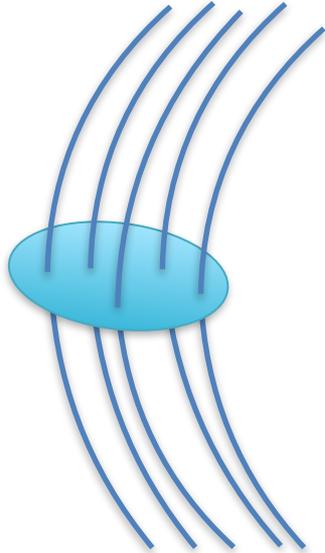


# アルフベン波



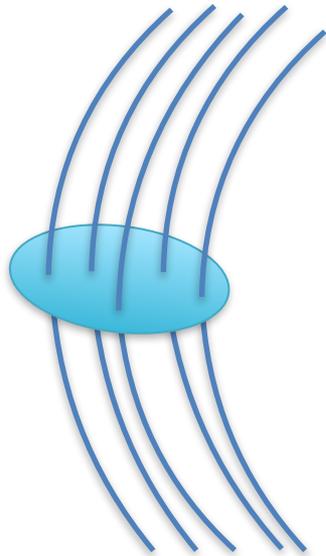
磁力線

# アルフベン波



磁力線

# アルフベン波



磁力線

背景磁場に沿った運動量



分散関係

$$\omega = \pm v_A k_{||}$$

$$v_A^2 = \frac{B^2}{e + p + B^2}$$

アルフベン速度

# アルフベン波: 散逸があるとき

分散関係

$$\omega = \pm v_A k_{||} - \frac{i}{2} [\bar{\eta} + \lambda] k^2$$

波の減衰

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$

$\sigma$  : 電気伝導度

$$\bar{\eta} \equiv \frac{\eta}{e + p + \mathbf{B}^2}$$

$\eta$  : ずれ粘性

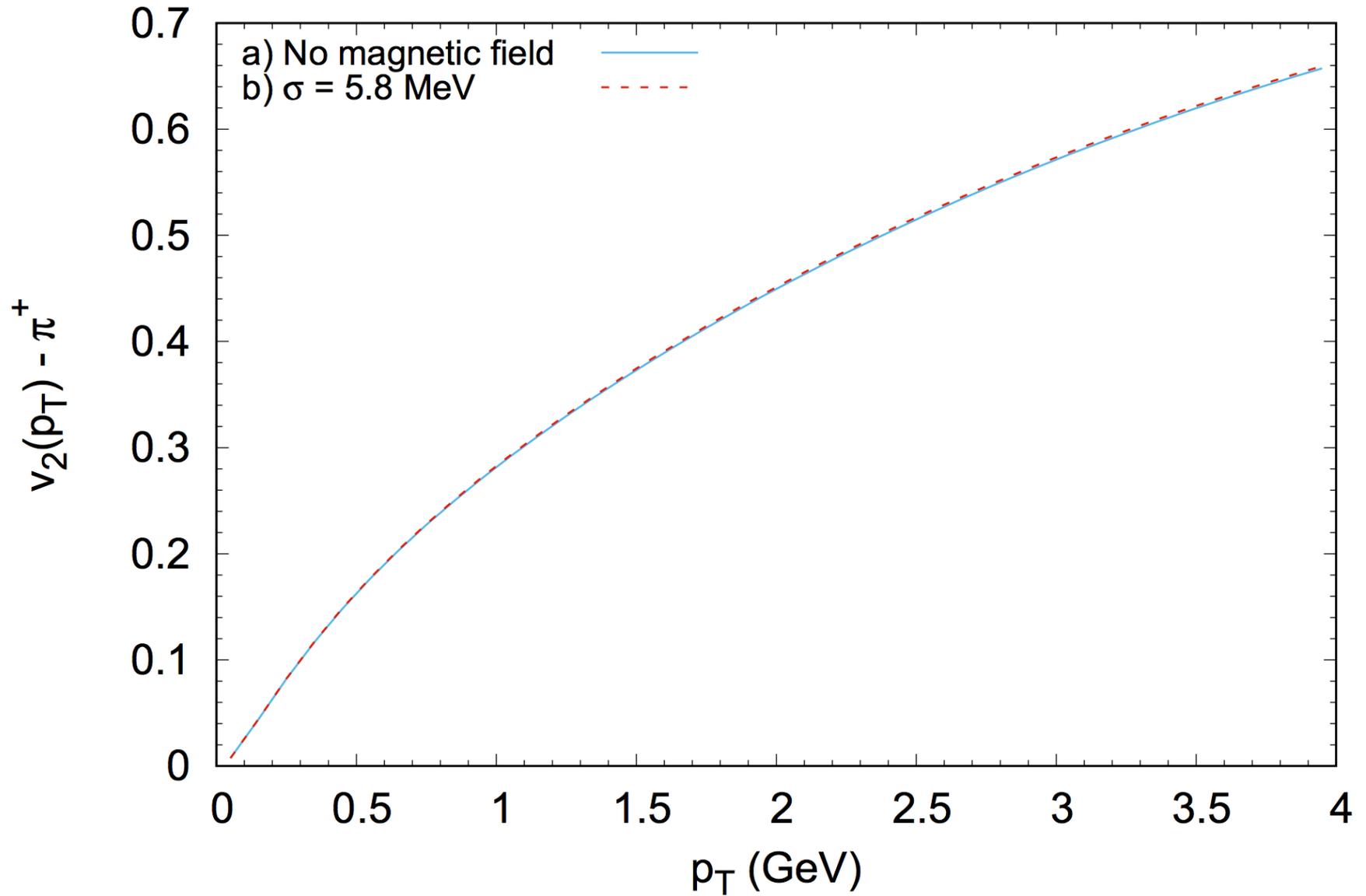
# 磁場の影響

# 電磁場の影響

- QGPのバルクの運動そのものに対する影響はあまりない
- 電荷依存の物理量は変わりうる  
電磁的性質のプローブに
- 電気伝導度
- カイラル磁気効果[山本さん]

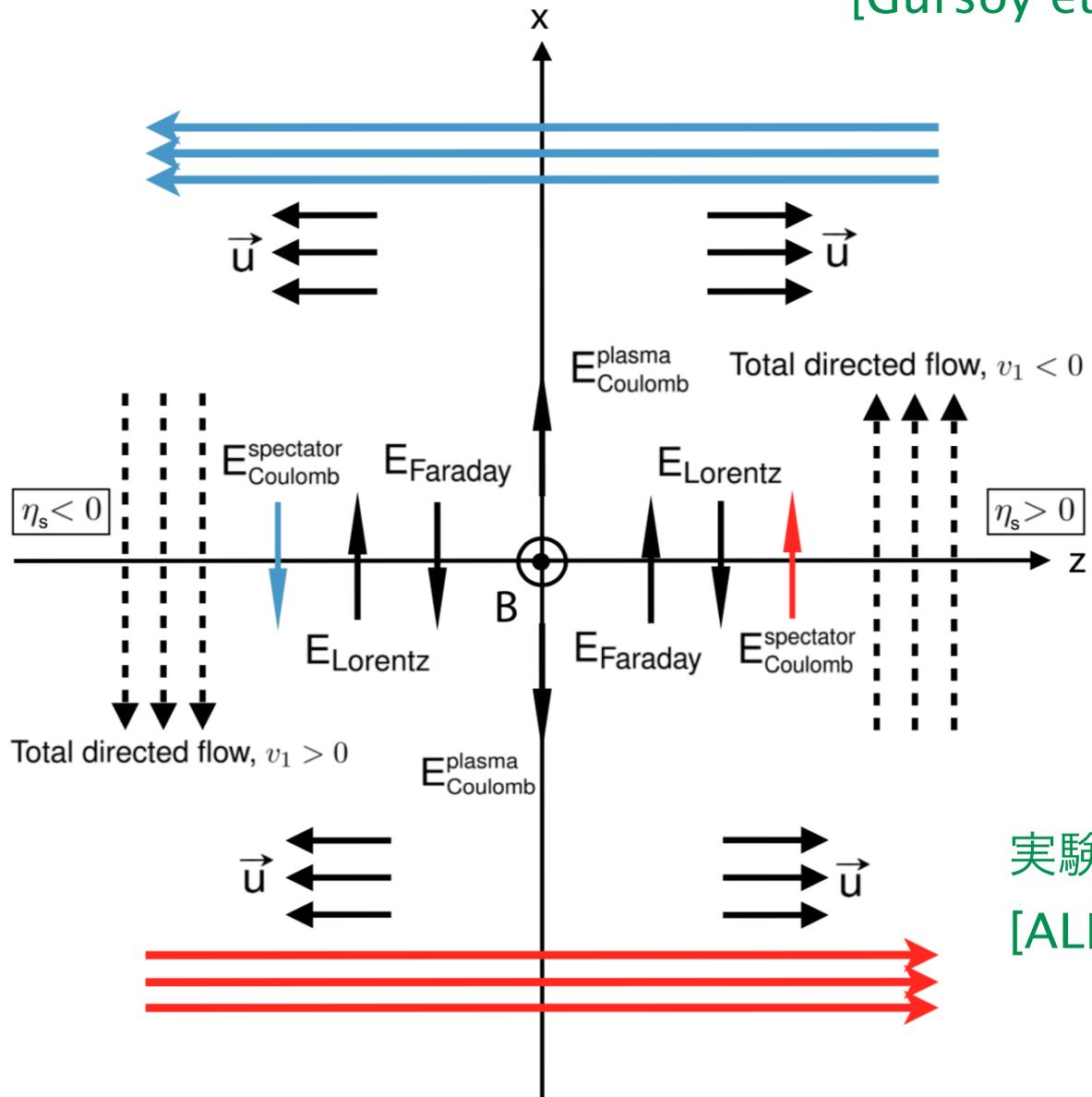
# v2

[Inghirami et. al. EPJC'16]



# 電荷依存 directed flow

[Gursoy et. al. PRC'18]



実験は逆の符号  
[ALICE1709.05618]

# 寄せられた疑問より

- 「衝突初期の磁場は測定できるか？」
  - $e+e^-$ のpt broadening
- 「電磁流体モデルによる初期高強度電磁場の時空発展」
- 「QGPおよび前平衡過程の時空発展に対して電磁場はどのような効果をどの程度与えるか？」
  - Maxwell的 or MHD的
  - bulkの観測量に対する影響は小さい
  - 電荷依存する物理量には影響
- 「系の熱伝導度や電気伝導度などの量を実験で測定することは可能か？」
  - ワンチャンあり得る
- 「QGPや原子核衝突にそろそろ飽きてきませんか？飽きないための思考法や取り組みを教えて欲しい。」