

高輝度電子銃シミュレーション研究会
平成18年12月8日
京都大学エネルギー理工学研究所)

原子・緩和過程に支配される “相乗的複雑性”プラズマのシミュレーション研究

Synergetic Complexity and structure formation of plasmas
dominated by atomic and relaxation process

岸本泰明 (Y. Kishimoto)

京都大学大学院エネルギー科学研究科

協力研究(謝辞)・内容

- プラズマと構造形成(非線形性・非局所性)
- 磁場閉じ込め核融合(トカマク)の紹介
- 相乗的複雑性(原子・分子・緩和・輻射過程)
- 放電・雷のシミュレーション
- 高強度レーザー物質相互作用シミュレーション

Numerical Scheme

T. Masaki : Kyoto University (Phd student)

Y. Kato : MITI, Tsukuda

Atomic and molecular process

T. Utsumi : Tokyo (Yamaguchi) Science University

K. Moribayashi : APRC, JAEA-Kansai

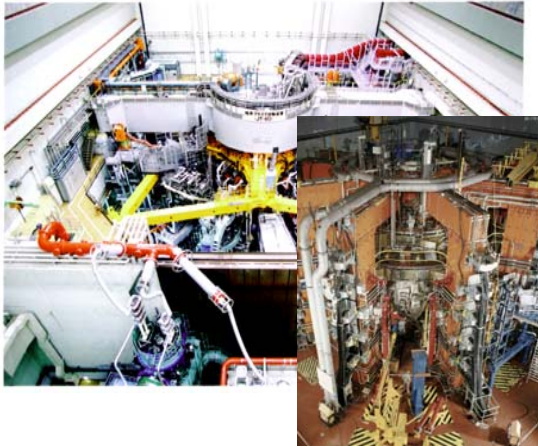
Experimental benchmark

Y. Fukuda : APRC, JAERI-Kansai

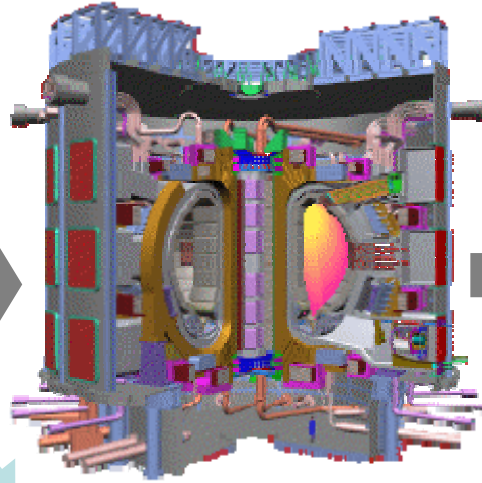
K. Yamakawa : APRC, JAERI-Kansai

Is computation “essential” or “supplementary”?

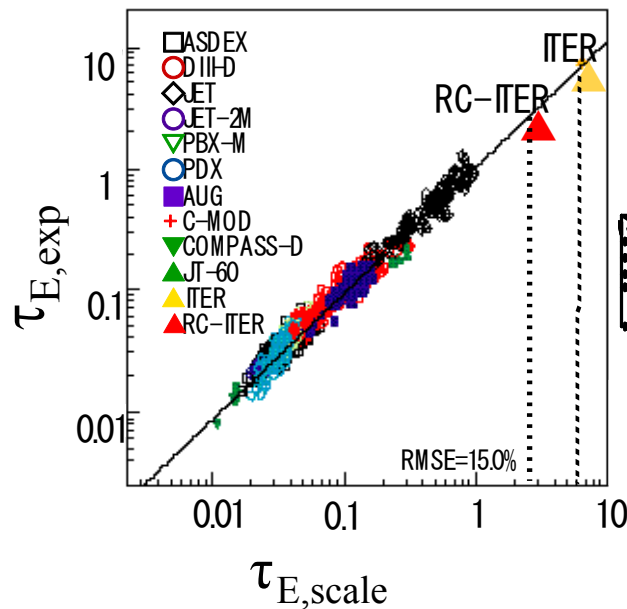
JT60/JET/TFTR



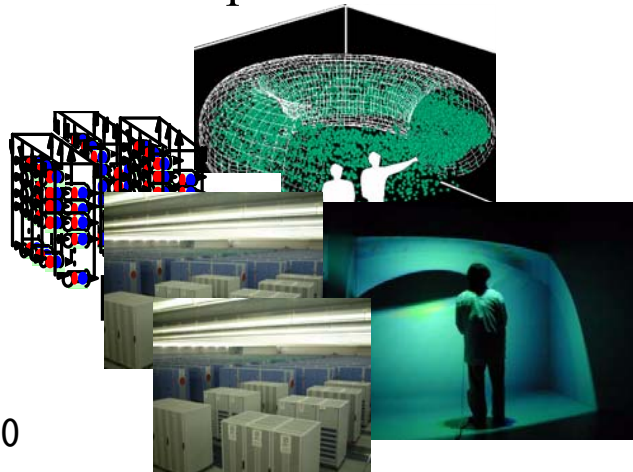
ITER: $P_{th}=0.5GW$



Fusion Power Plant



Computational ITER



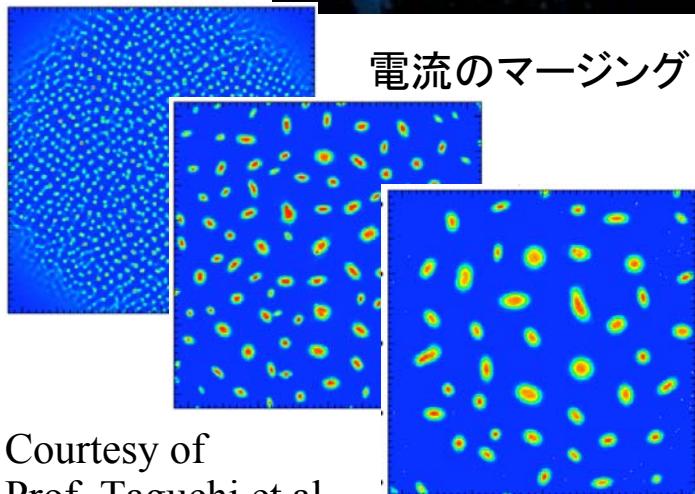
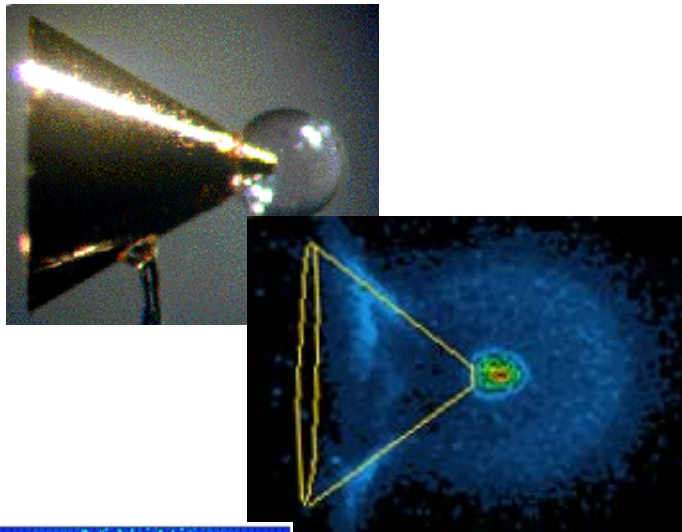
Fusion power $E_f \sim 3GW$ with ITER level plasma volume

$$E_{\text{fusion}} \sim P(\text{pressure})^2$$

2.5-3 times higher pressure

非線形性に準拠したレーザー核融合研究

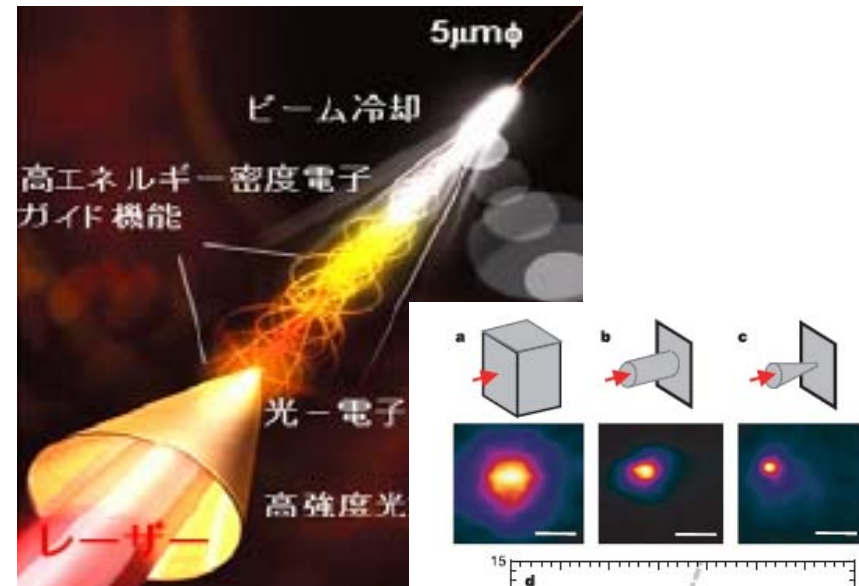
高エネルギー密度状態の応用例
→ 高速点火



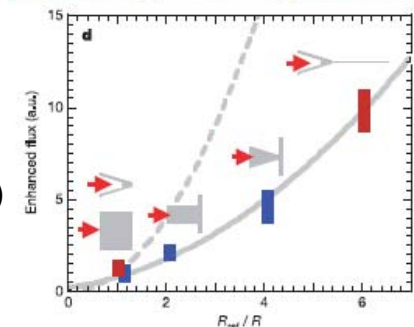
電流のマーキング

Courtesy of
Prof. Taguchi et al.

高エネルギー密度状態をデバイスとして応用



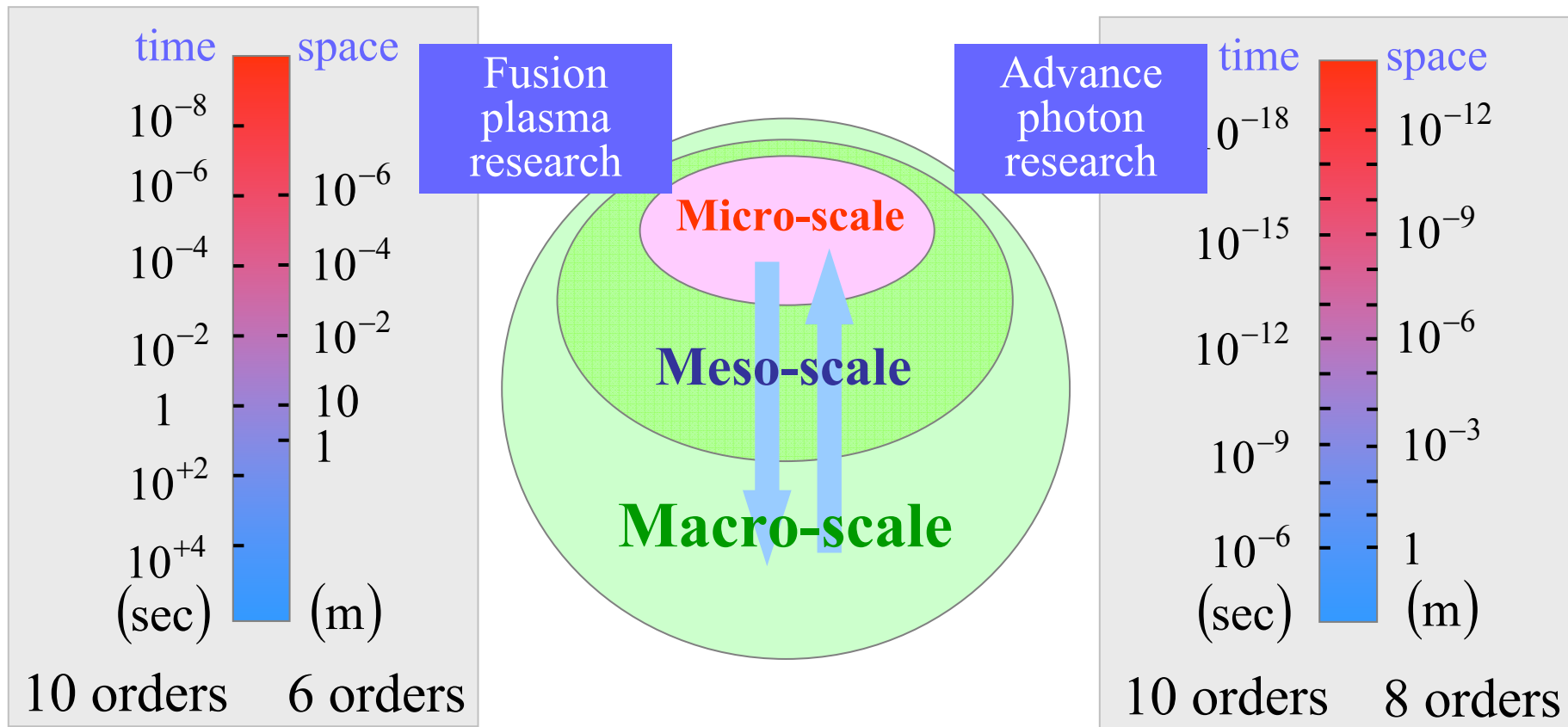
R. Kodama et al.,
Nature 432, 1005 (2004)
Prof. Taguchi et al.



「強非線形性」に伴う構造と
「過渡過程」の制御

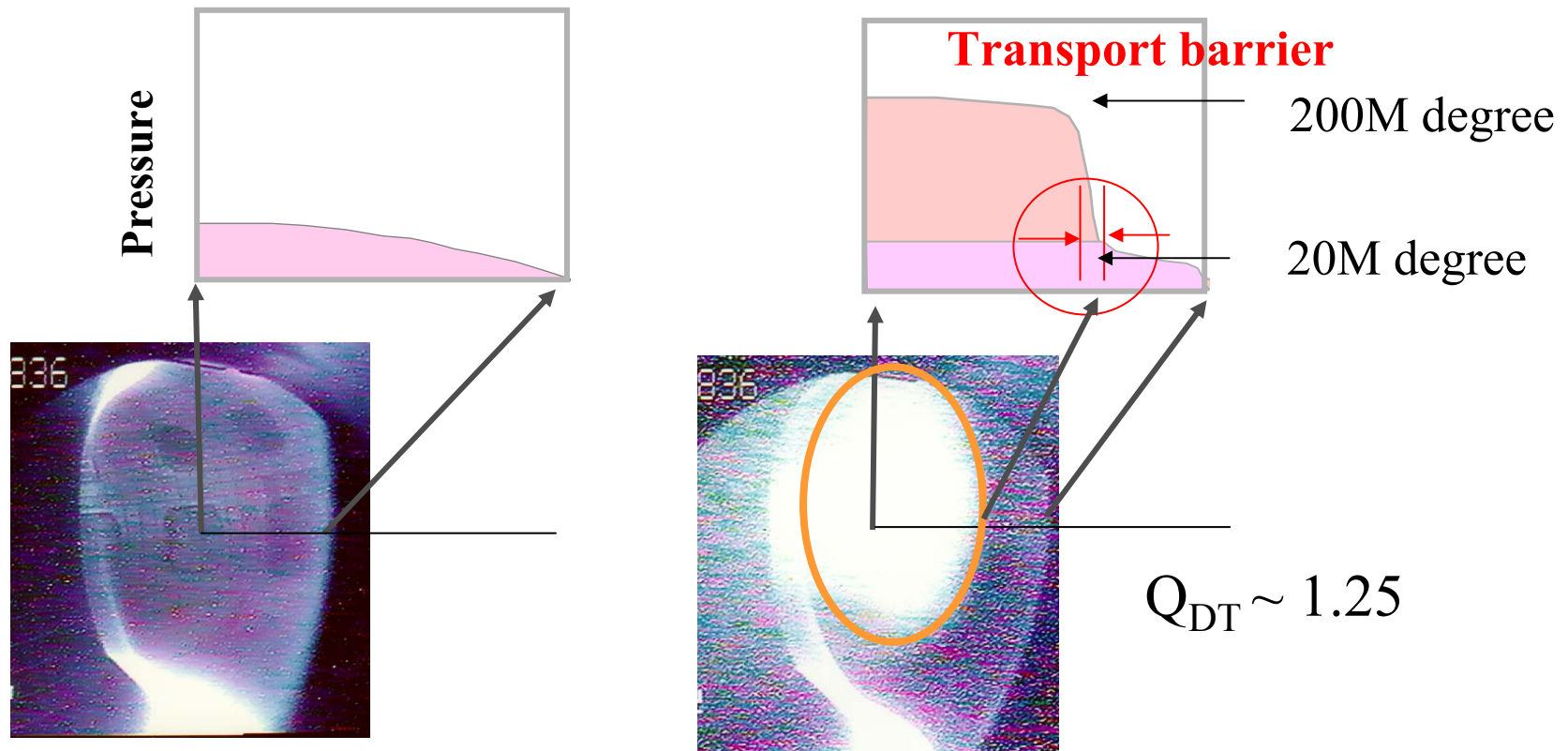
Multi-Scale and Multi-Physics Nature of the Problem

- ▶ Coupled effects spanning wide range of spatial and time scales
- ▶ Coupling effects of qualitatively different physical process



A high performance plasma is realized by having “structure”

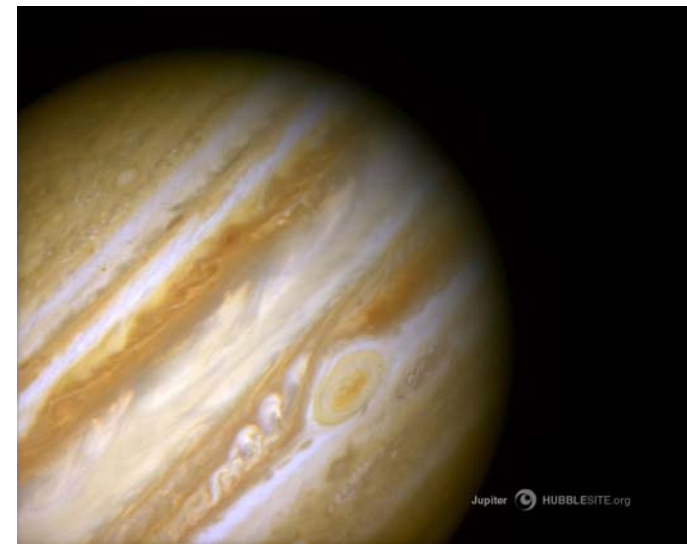
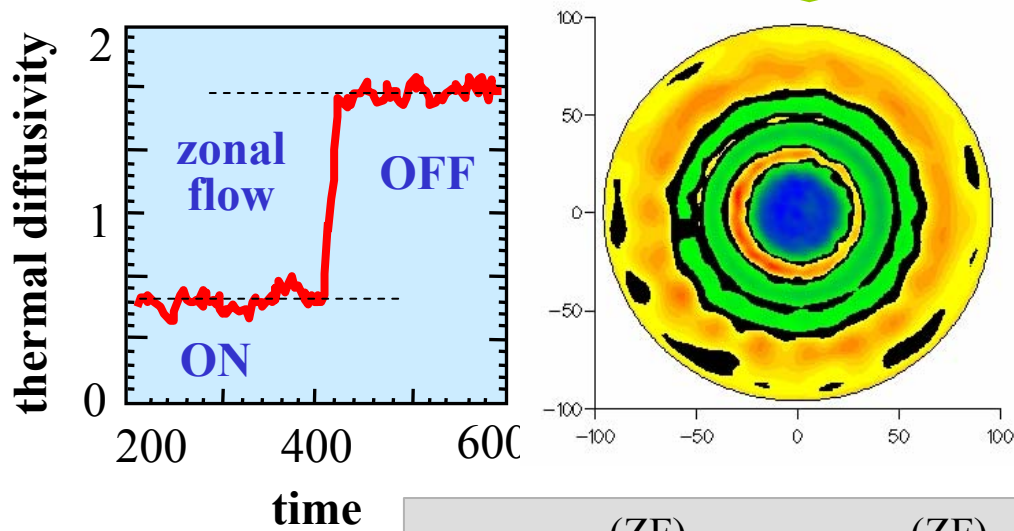
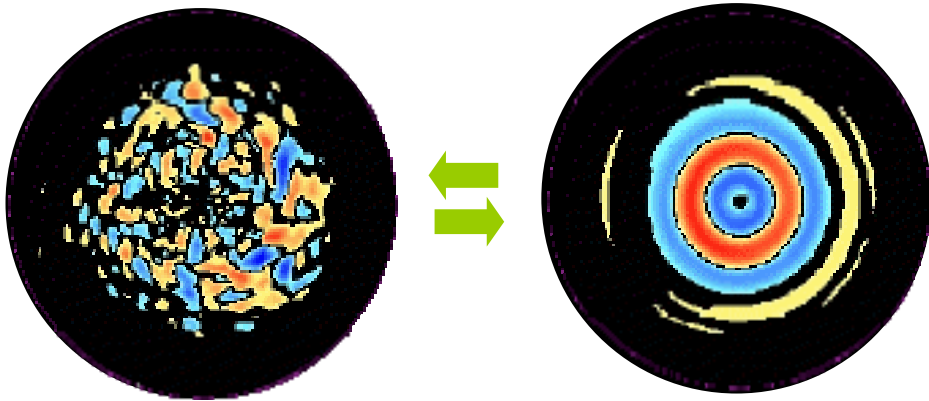
JT-60 High Performance Shot



Low confinement plasma

High confinement plasma

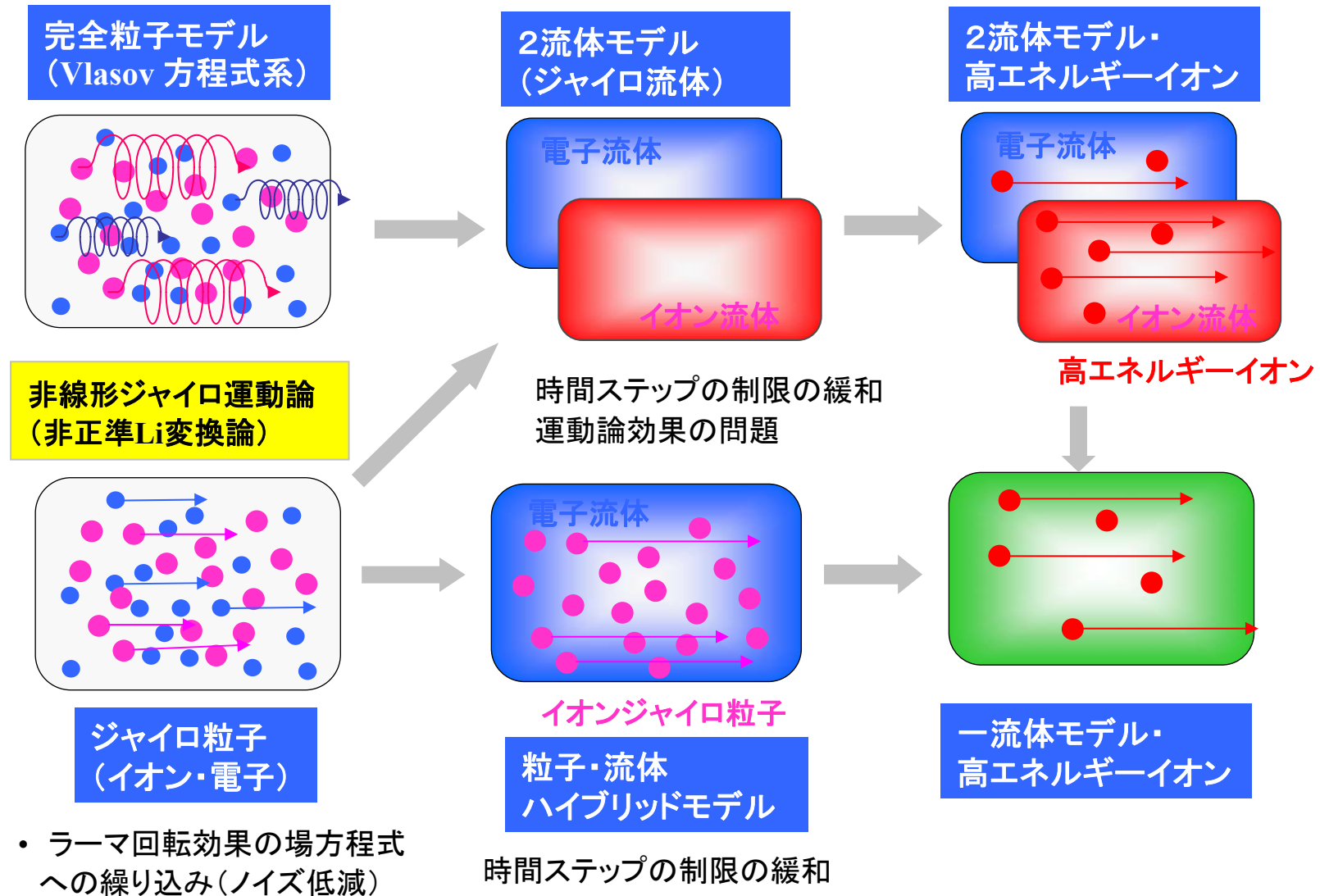
トカマクプラズマにおける揺らぎの構造



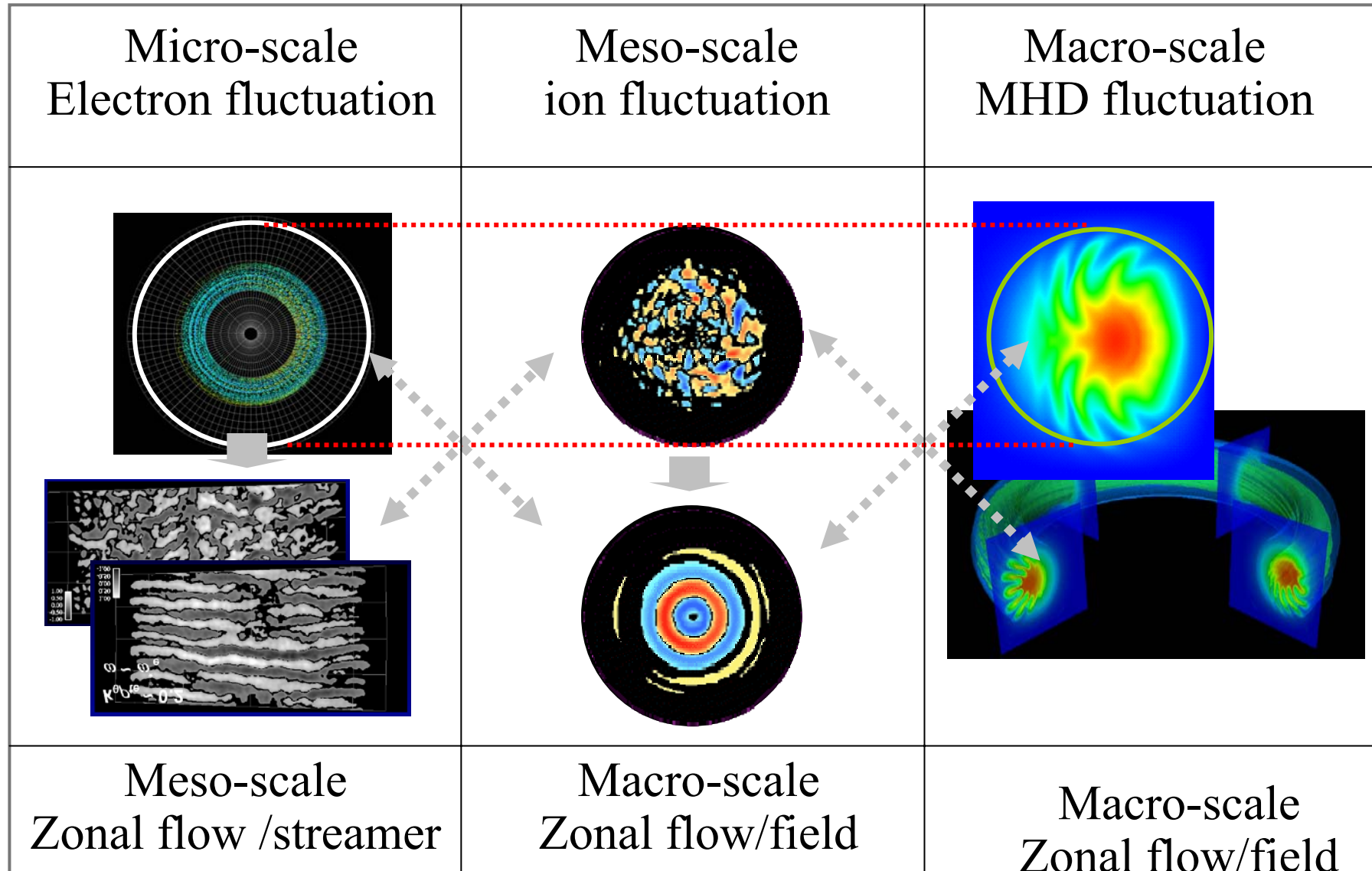
$$\eta_{zF} \equiv \frac{E^{(ZF)}}{E^{(tot)}} = \frac{E^{(ZF)}}{E^{(turb)} + E^{(ZF)}}$$

World dominated by turbulence and flows

様々な核融合プラズマシミュレーション手法



Interaction among different scale fluctuation

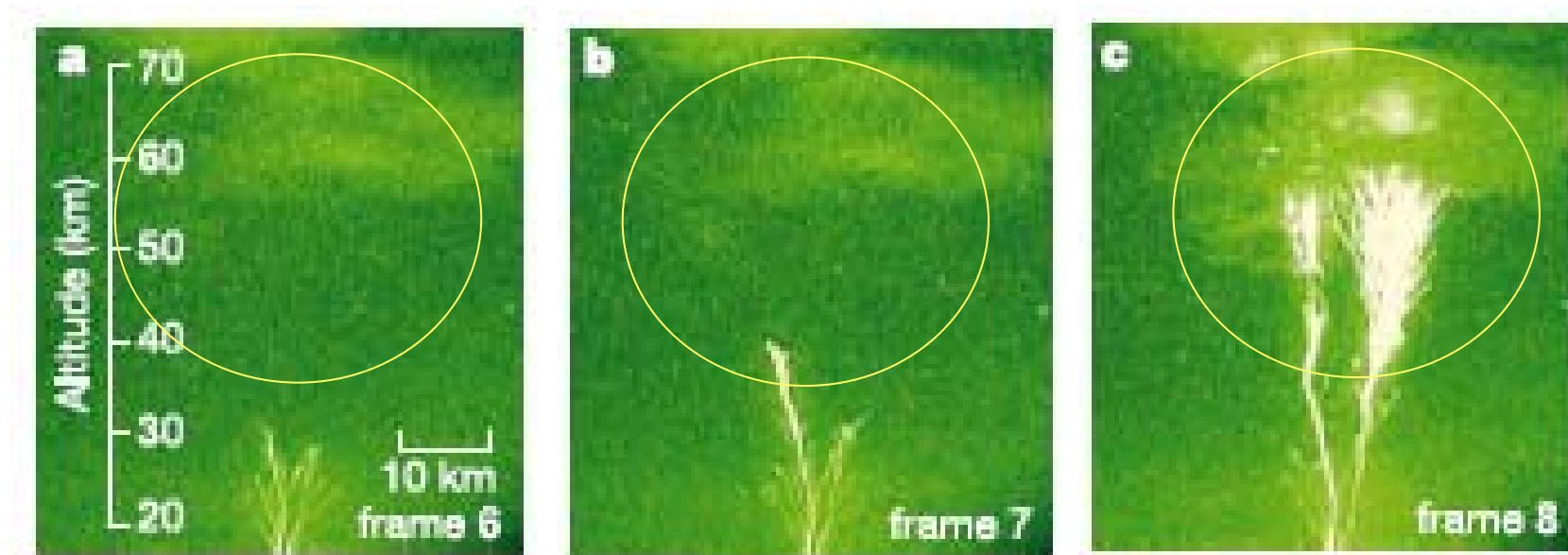


放電・雷過程：爆発的な電離波の伝播

Pasko et.al. Nature 416, 152 (2002)

長時間の準備期間
(初期状態の設定)

爆発的な電離波伝播



blue jet (cloud tops)
 $v \sim 10^5 \text{ m/sec}$

Sprite (near ionsphere)
 $v \sim 10^7 \text{ m/sec}$

時定数の変化
突発性

平成16年3月3日(水) : 新橋・航空会館

3月4日(木) : 日本原子力研究所計算科学技術推進センター

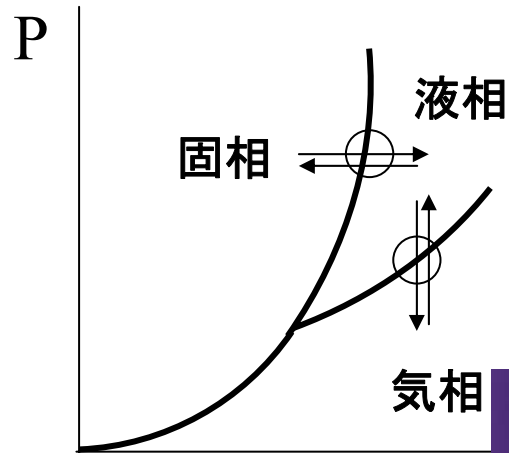
多階層・複合系プラズマの切り開く 学際領域の開拓

非線形不安定性と爆発(突発)現象の理解

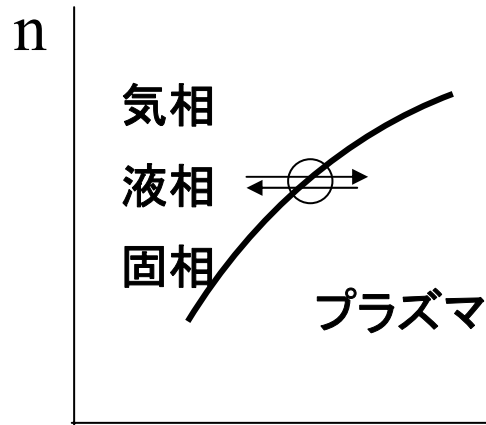
岸本 泰明

日本原子力研究所 炉心プラズマ研究部 プラズマ理論研究室

相変化における幾何学構造と時間スケール



- 過冷却媒質中の樹枝状の凝固
- 粘性媒質中の粘性指状体 等



空間 : 突起構造、(対象性)
自己相似性・フラクタル性

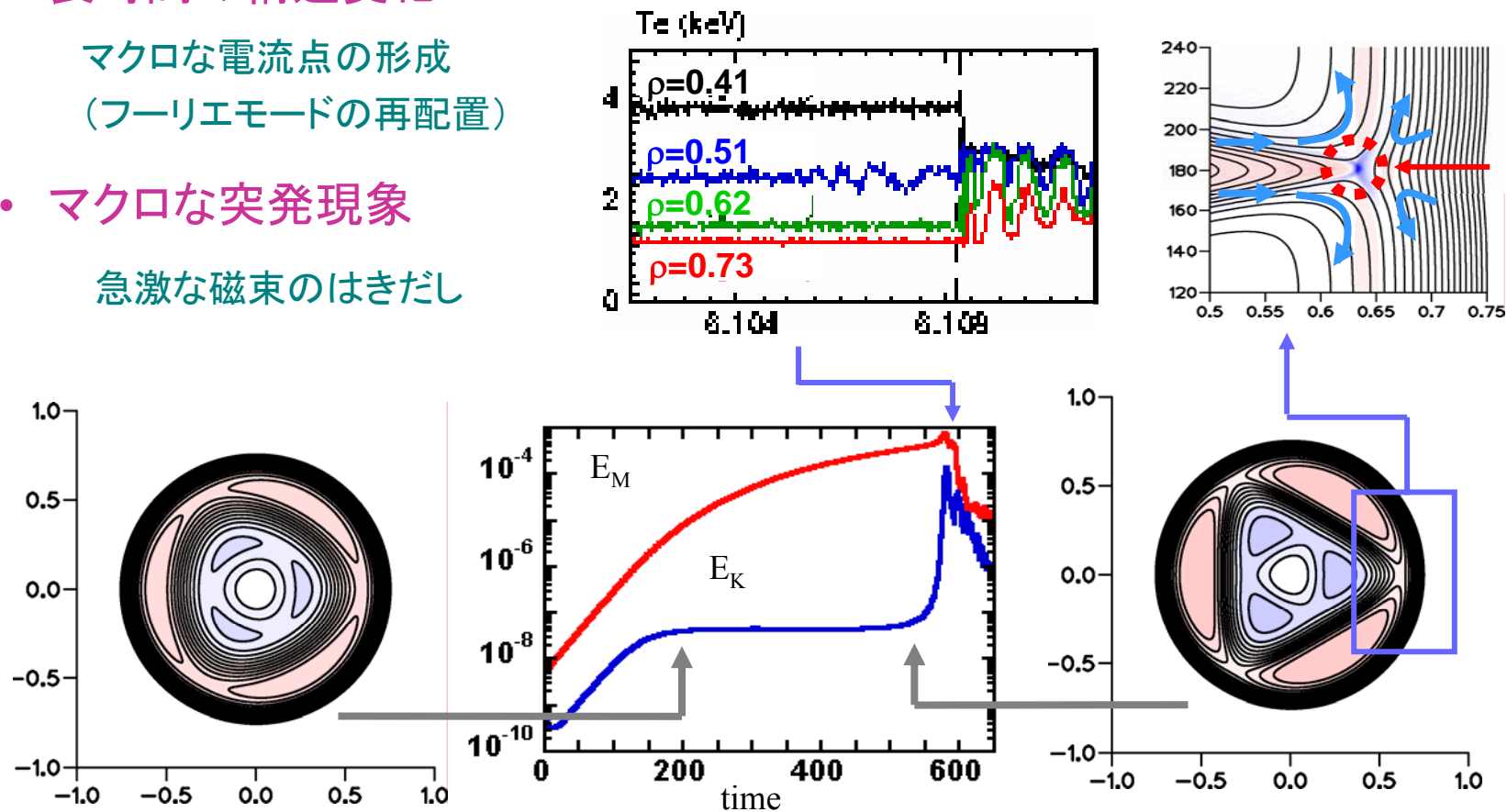
時間 : 雪崩的伝播(非拡散的)
爆発現象(非線形不安定性)

トカマクプラズマにおける揺らぎの構造と突発性

トカマクプラズマの磁場構造 (磁気再結合)

Ishii, Azumi, and Kishimoto :
PRL, 89, 115002(2002)

- 長時間の構造変化
マクロな電流点の形成
(フリーモードの再配置)
- マクロな突発現象
急激な磁束のはきだし



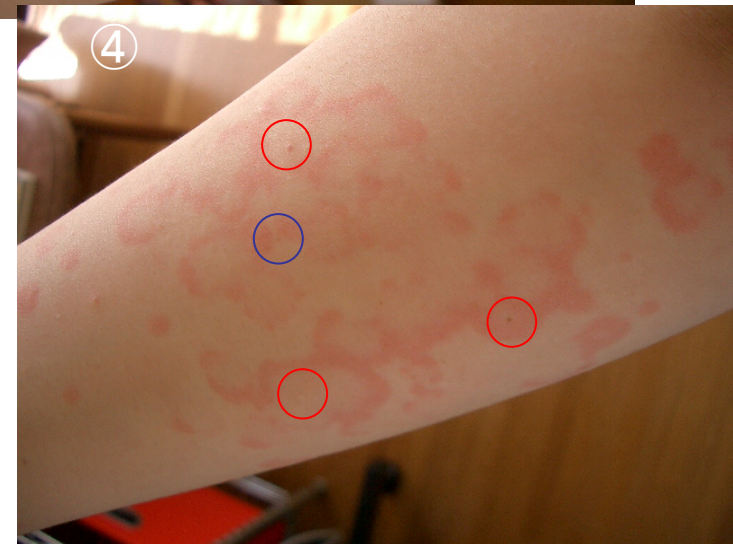
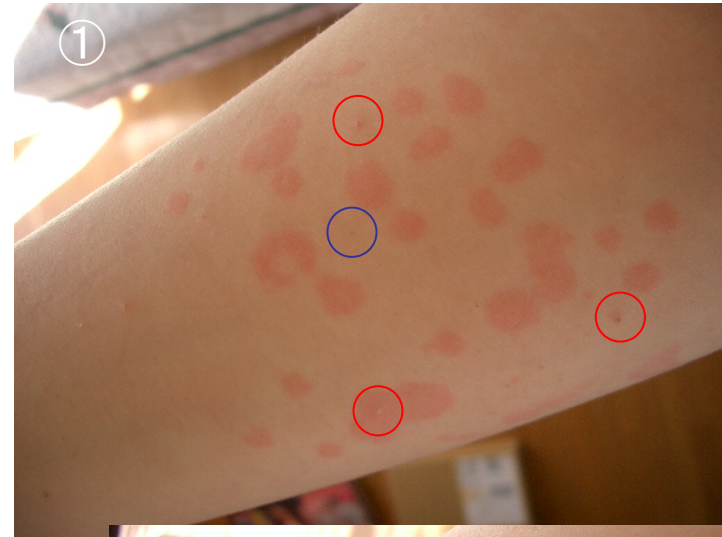
蕁麻疹の出現と突発性

謝辞： 広島大学大学院医歯薬学総合研究科 秀道広教授

Long period for preparation
for setting “initial condition”

皮膚の広範囲
活性状態？

内部／外部
トリガー



構造と爆発(突発)現象: 初期値の科学

● “初期状態(条件)”の物理

- エネルギー変化は微小
- “構造”の質的变化 臨界・活性化状態

● トリガーの物理

- 内的トリガー・外的トリガー
- 決定論的・確率論的

● エネルギー解放・爆発的不安定性の物理

- 爆発・発散、構造破壊
- 新しい緩和状態

時空間スケールの高階層性
異なった物理過程の複合系

多階層・複合系プラズマ開拓

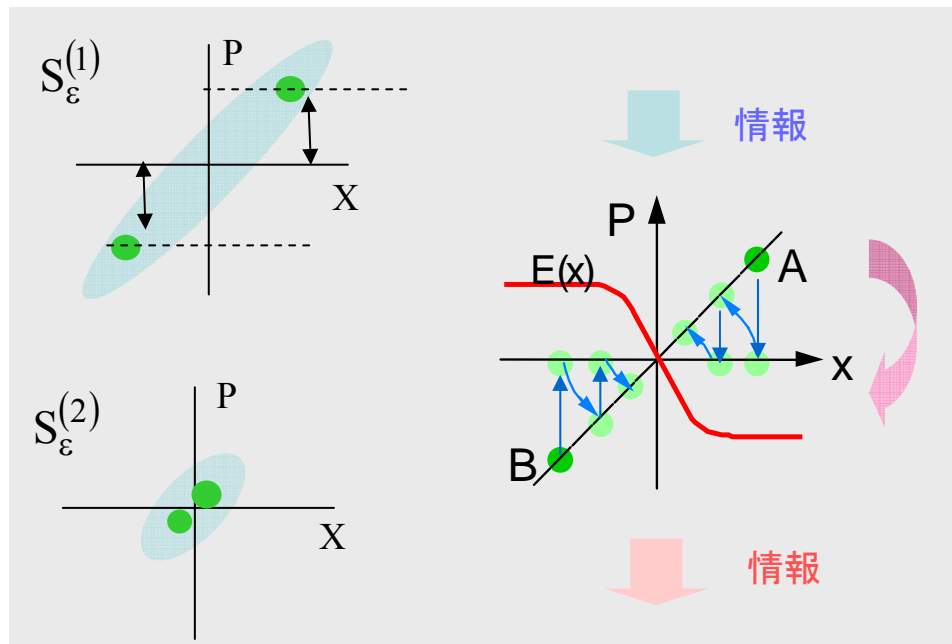
構造形成とエネルギー

- 非線形性(自己組織化・自律性)に信頼・期待を寄せることは是か？

cf. 巨大システム(加速器・高パワーレーザー等) → プラズマ性(自律性)を排除

- 非線形性の理解の度合い → 普遍性を持つ事象として法則化できるか？
- 非線形性の制御の展望

- (私見) 構造変化に“エネルギー”は必ずしも要しないはず！



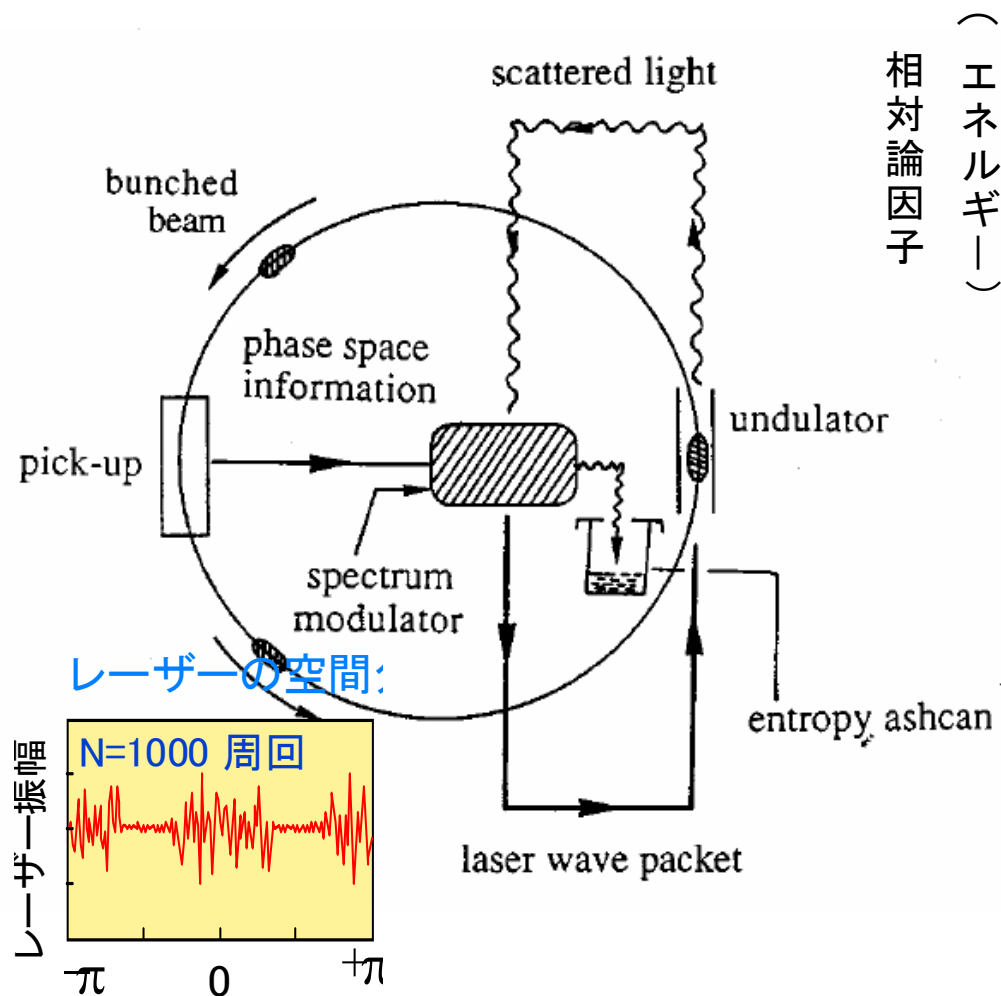
- エネルギー収支 $\Delta E \sim 0$
- エミッタンス収支 $\Delta S_\epsilon \sim \text{finite}$

$$\frac{\partial S_\epsilon}{\partial E} \gg \frac{\partial S}{\partial E} \left(\cong \frac{1}{T} \right)$$

- 情報の同定(状態の観測)
- 情報の入出力(開放系)

レーザーによる電子ビームの高速冷却

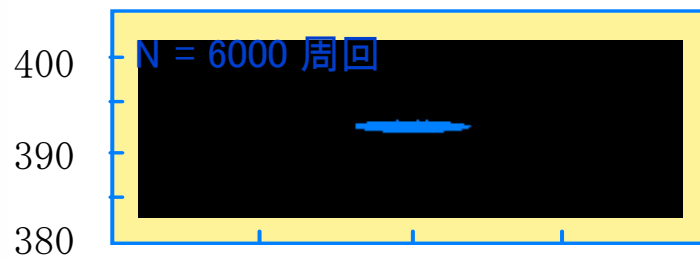
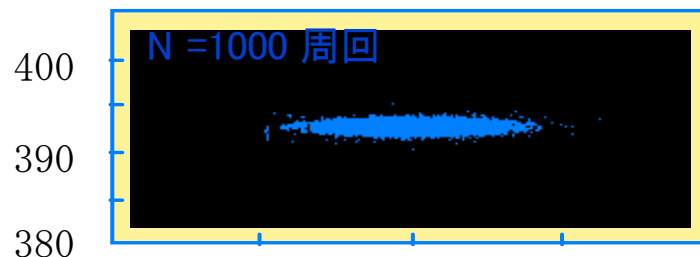
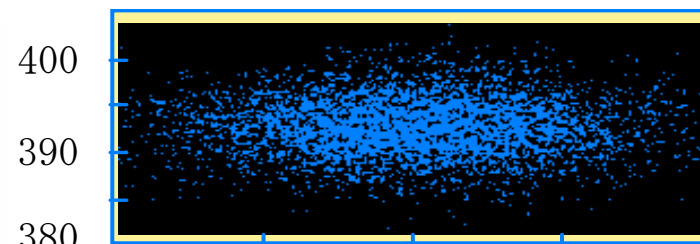
Y. Kishimoto, et al., Phase space control and consequence for cooling using laser-undulator beat wave, Phys. Rev. E55, 5948 (1997)



ビームの位相空間

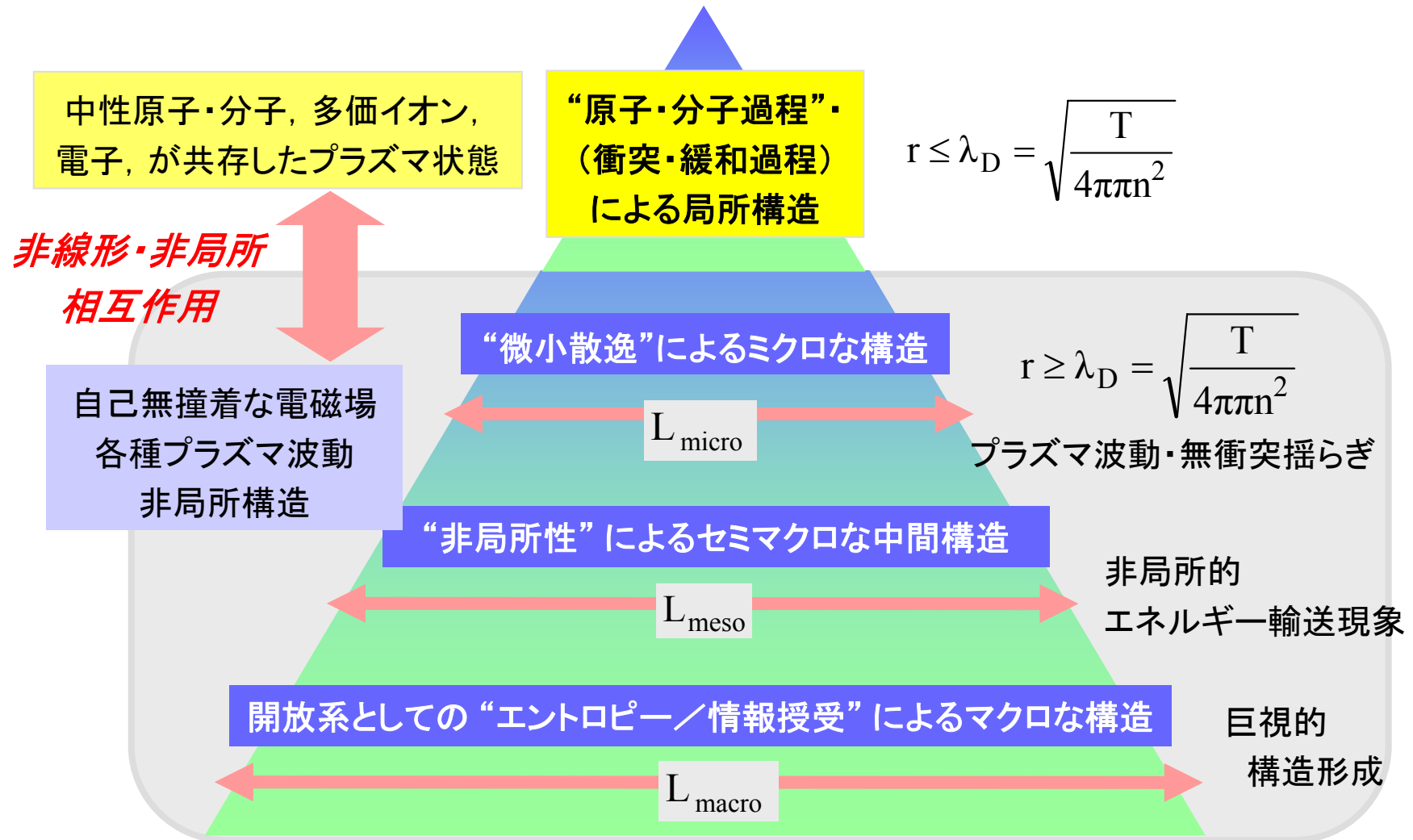
N = 1 周回 (初期分布)

(エネルギー)
相対論因子



- 1.0 0 +1.0
進行方向の座標 x (mm)

原子過程を伴うプラズマの“相乗的複雑性”



平成17年度研究会

原子・分子過程が関与したプラズマの 相乗的複雑性と構造形成

Synergetic Complexity of plasmas and structure formation
dominated by atomic and molecular processes

日時：平成18年3月8日(水)

会場：京都テレサ
京都市南区新町通九条下ル
京都府民総合交流プラザ内

主催：核融合科学研究所「分野間連携による
学際的・国際的研究拠点形成」プロジェクト

文部科学省特定領域研究
「強レーザー光子場における分子制御(H14-17)」

協賛：京都大学大学院エネルギー科学研究科
エネルギー基礎科学専攻

はじめに

これまで、核融合プラズマや宇宙・天体プラズマをはじめ、散逸の小さな高温プラズマの物性が複雑性の観点から精力的に研究され、理解が進展しました。一方、自然界や実験室プラズマに広く目を転じると、そこでは、固体や液体、気相、あるいは少数多体系であるクラスターや粉塵なども含め、様々な状態にある物質が、複雑な原子・分子過程や輻射・衝突緩和過程を通して、中性原子や分子、多価イオンや電子などが共存した多彩なラズマ状態を作り出します。これらのプラズマは、無衝突プラズマの特性に加え、原子・分子過程や衝突・緩和過程が加わることによって複雑性のレベルは格段に(また相乗的に)増大し、これが起因となって豊富かつ新奇な現象が創出されます。

大気圏や電離層などで発生する放電・雷過程はその典型例であり、それらが有する予測困難な突発的な発生機構や微細な分岐構造は非線形物理学や非平衡統計力学の観点からも興味深い課題です。太陽表面や輻射場の影響を受けた星間ガス、磁気圏構造などにもこのようなプラズマ特性を見ることができます。また、近年著しい展開を見せている高強度レーザーと物質との相互作用において創り出される極限プラズマやプロセスプラズマ、あるいはプラズマの着火過程やそれに伴うプラズマ形成にも原子・分子過程や緩和過程が深く関与しています。核融合プラズマにおいてもディスラプション時に発生する相対論的大電流逃走電子とアルゴンやネオンなどの高Zガスとの相互作用も興味深い問題です。近年ではこのようなプラズマ過程を産業応用に役立てようとする試みもあります。

本研究会では、このような原子・分子過程や輻射・緩和過程によって支配されるプラズマのダイナミクスを、“相乗的複雑性”と位置づけ、この複雑なプラズマ物性を分野横断的に議論することにより、プラズマに対する理解を一層深めるとともに、様々な応用研究の展開を図ることを目的としています。

年度末の忙しい中にも関わらず、中国・韓国からの参加者を含め、多くの方々に参加いただき、多数の興味深い講演と活発な討論をいただきました。「風変わりなタイトルの研究会だが、このような視点は大変面白い」とのご意見も多数いただきました。また、研究会最後の討論では、複雑過程に対する現象の分類や基本的なモデル構築の重要性や、原子・分子物理分野の研究者とプラズマ分野の研究者が集って新しい課題を開拓する意義なども議論されました。

あらゆるプラズマは複雑な原子・分子過程を通して生成されます。本研究会が、この古くて新しい問題の研究進展に向けての一助になれば幸いです。

尚、本研究会は、核融合科学研究所「分野間連携による学際的・国際的研究拠点形成」プロジェクト、文部科学省特定領域研究「強レーザー光子場における分子制御」の援助を得て開催されました。心より感謝申し上げます。

京都大学大学院エネルギー科学研究科
岸本 泰明

研究会プログラム 日程:平成18年3月8日(水) 9:15—18:00

9:15-9:40 研究会趣旨説明 (P.1) 岸本泰明(京都大院エネルギー科学研究科)

9:40-10:40 磁気圏・宇宙における雷・放電現象
司会: 高村秀一(名古屋大学院工)

1. 大気圏・磁気圏における雷・放電現象と構造形成 (P.11) 福西 浩(東北大院理学研究科)
2. 宇宙・惑星におけるプラズマダイナミクスと原子・分子過程 (P.33)
島津浩哲(情報通信研究機構)

10:40-10:50 休憩

10:50-12:10 プラズマ着火のダイナミクスとプラズマ生成
司会: 近藤克己(京都大院エネルギー科学研究科)

3. 高周波誘導生成熟プラズマの点火ダイナミクス (P.49) 高村秀一(名古屋大院工学研究科)
4. 電子サイクロトロン共鳴加熱による球状トラス形成 (P.61)
前川 孝(京都大院エネルギー科学研究科)
5. マイクロ波による気中放電のダイナミクスと構造形成 (P.71)
小田靖久(東京大院新領域創成科学研究科)
坂本慶司(日本原子力研究開発機構)

12:10-13:20 昼食

13:20-14:50 極限プラズマダイナミクスとプラズマ応用
司会: 長崎百伸(京都大エネルギー理工学研究所)

6. 高エネルギー密度物質における原子過程と物性 (P.87) 兒玉 了祐(大阪大院工学研究科)
7. 高強度相対論的電子ビームのプラズマ・気体との相互作用
—トカマクプラズマ中の逃走電子拳動— (P.99)
河野康則(日本原子力研究開発機構)
8. 微細加工・レーザー着火を目指したマイクロチップレーザー開発の現状 (P.111)
平等拓範(自然科学研究機構分子科学研究所)

15:50-15:10 休憩

15:10-16:10 原子過程が関与した複雑性プラズマのダイナミクス
司会: 福田祐仁(日本原子力研究開発機構)

9. プラズマプロセス過程における原子・分子過程と構造 (P.121) 斧 高一(京都大院工学研究科)
10. Ionization Instabilities and Voids in Complex Plasmas (P.159)
Xiaogang Wang (Dalian University of Technology)

16:10-16:20 休憩

16:20-17:20 原子過程を伴う複雑プラズマのモデル化 司会: 加藤 進(産業技術総合研究所)

11. EUV光源の原子・輻射流体力学統合シミュレーション (P.171)
佐々木明(日本原子力研究開発機構)
12. Nonlinear polarization effects on laser propagation in Gas (P.183)
J. Koga(日本原子力研究開発機構)

17:20-17:50 総合討論 司会: 岸本泰明(京都大院エネルギー科学)

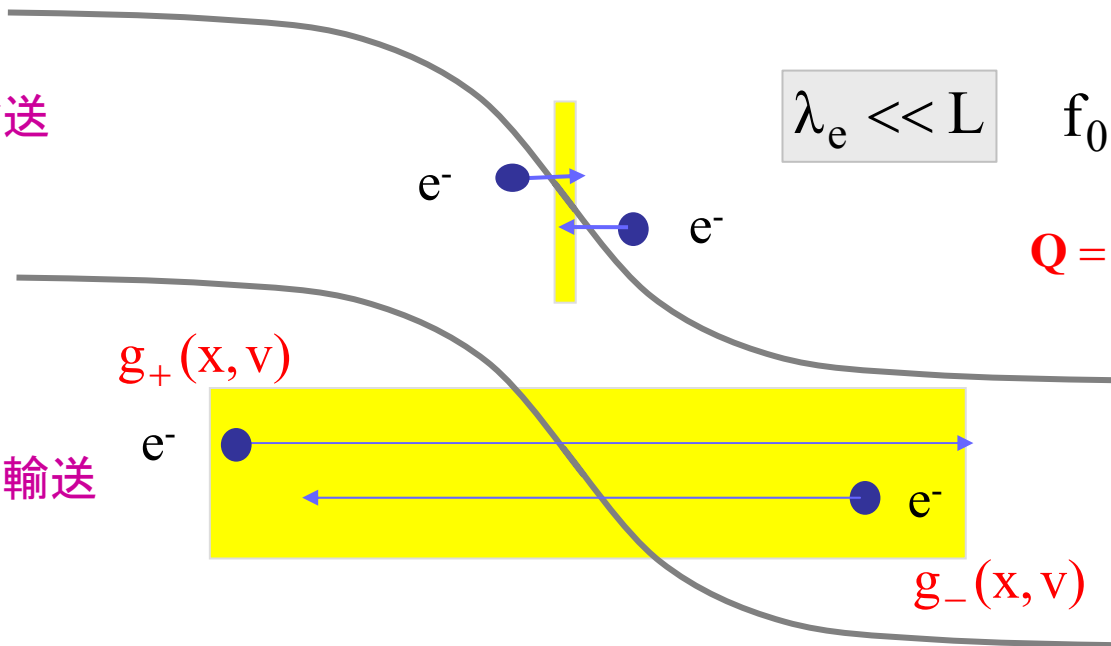
18:00 閉会

“流れ”と“勾配”の関係と非局所性

Fick の法則 $\begin{pmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{Q} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \nabla T \end{pmatrix}$ $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1/\eta & \alpha \\ -\beta & -\kappa \end{pmatrix}$ $Q = -\kappa \left(1 - \frac{\alpha\beta\eta}{\kappa} \right) \nabla T$ for $J = 0$

$\mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{X}$

局所輸送

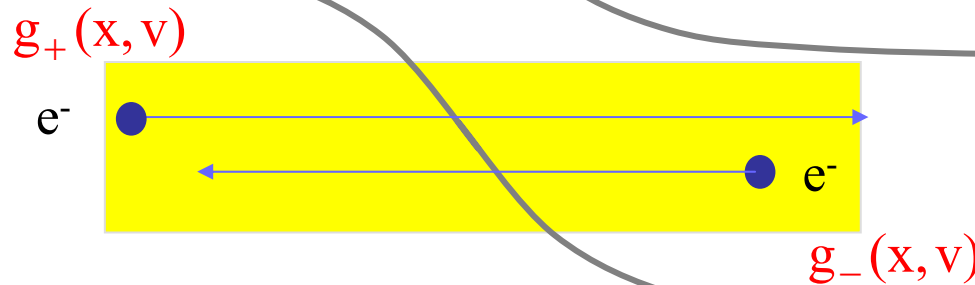


$\lambda_e \ll L$

$f_0(x, v) = f_M(x)$

$Q = -\kappa_{S-H} \frac{dT}{dx}$ $E = -\frac{5}{2e} \frac{dT}{dx}$

非局所輸送



$\lambda_e \leq L$

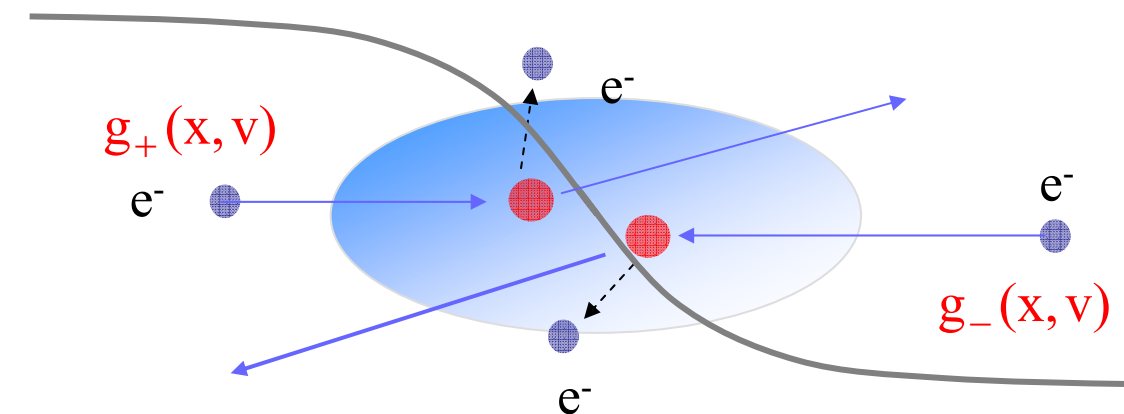
$Q = -\kappa_{S-H} \frac{dT}{dx} \left\{ 1 + \left[\delta_1 \left(\frac{\lambda_e}{T} \frac{dT}{dx} \right)^2 + \delta_2 \left(\frac{\lambda_e^2}{T} \frac{d^2T}{dx^2} \right) + \delta_3 \lambda_e^2 \left(\frac{dT}{dx} \right)^{-1} \frac{d^3T}{dx^3} \right] \right\}$

cf: $\frac{\lambda_e}{L} \sim 10^{-2}$

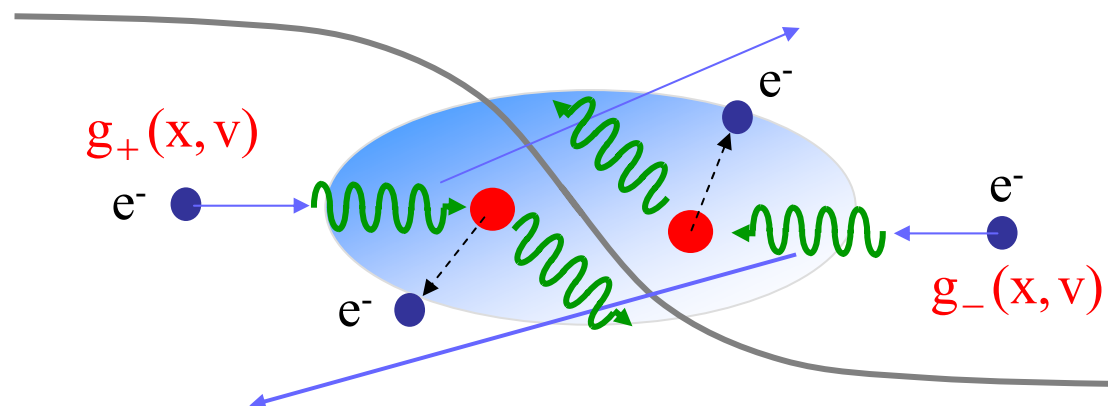
$f_0(x, v) = \int_{x_1}^{\tilde{x}} dx' W(x, x') f_M(x') + [g_+(x, v) + g_-(x, v)]$

プラズマ生成を伴う非局所輸送

電子衝突
によるイオ化



場による
イオ化



$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{v}{3} \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{eE}{mv} \frac{\partial}{\partial v} \right) f_1 - \frac{2eE}{3mv} f_1 = C_{ee}(f_0) + \mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \hat{\mathbf{E}})$$

$$\hat{\mathbf{E}} = \mathbf{E}_{\text{static}} + \mathbf{E}_{\text{induced}} + \mathbf{E}_{\text{external}}$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + v \left(\frac{\partial}{\partial x} - \frac{eE}{mv} \frac{\partial}{\partial v} \right) \left(f_0 + \frac{2}{5} f_2 \right) - \frac{6}{5} \frac{eE}{mv} f_2 = -\frac{v_e^4}{\lambda_e v^3} f_1$$

- 両極性電
- プラズマ波動
- 外場(レーザー場・輻射など)

原子・分子過程を取り入れた統合化コード(EPIC3D)

Interaction between various material state and energetic particles

Material state : Gas, fluid, solid, dust, cluster, etc
Energetic particle : Laser, EM radiation and X-ray, electron, etc.

Idea plasma dynamics by collective motion

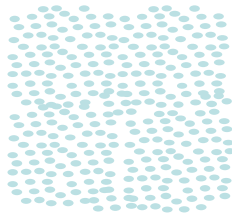
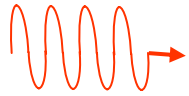
- Change of medium characteristics (dielectric permittivity)
- Linear and nonlinear optical properties (collective field, wave propagation)
- Collective particle acceleration
- Secondary radiation (higher harmonics, EUV, X-ray, γ -ray)
- Collisional relaxation, thermalization (linear/nonlinear heat transport)

Change of individual particle state

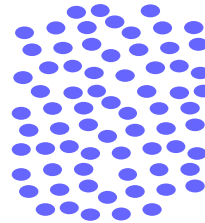
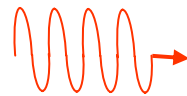
- Atom polarization, alinement, dissociation, chemical bonding, electron attachment
- Atomic process (ionization, recombination, various excited states)
- Nuclear process (electron-positron pair creation, nuclear transmutation)

Enhanced particle based integrated code (EPIC3D)

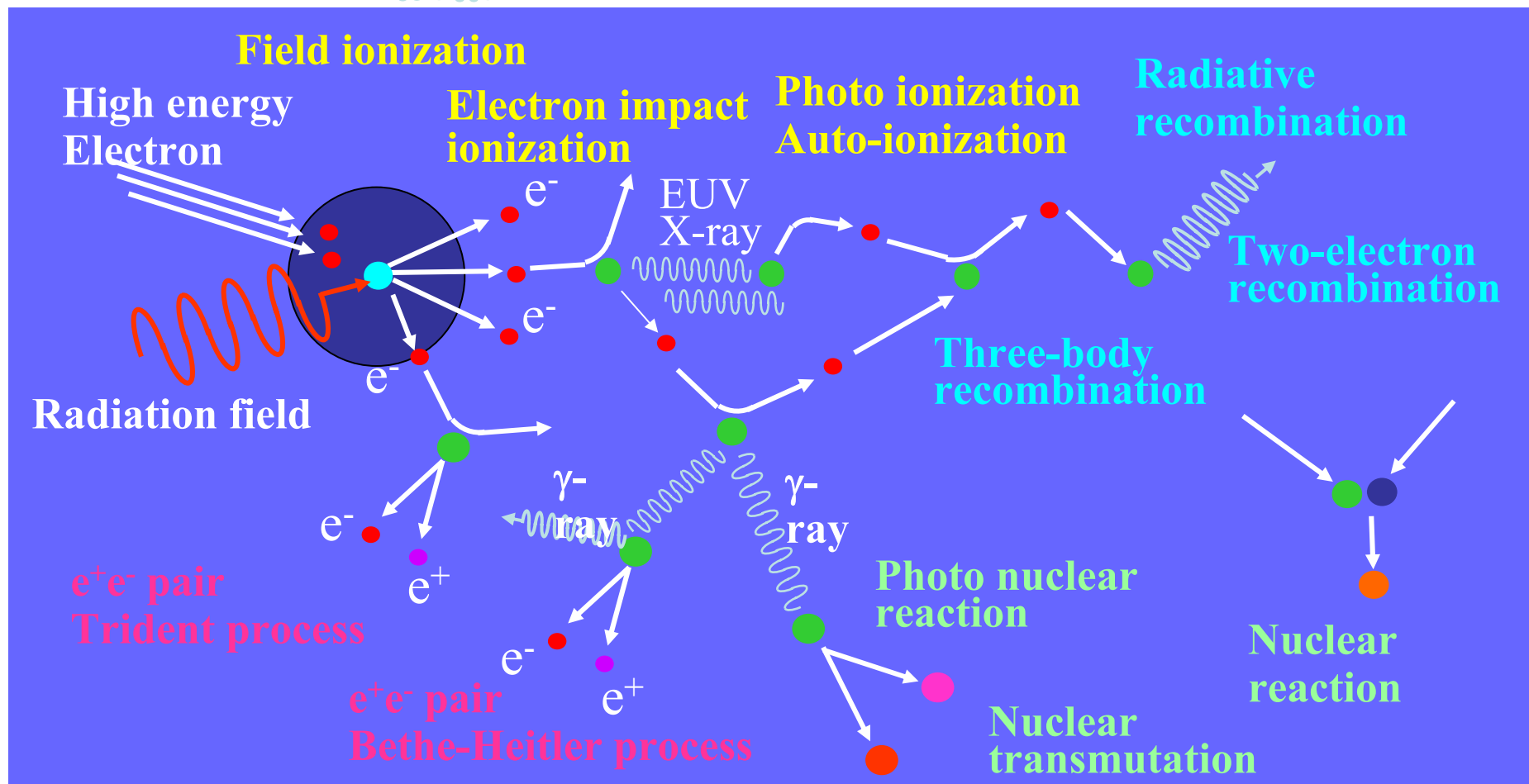
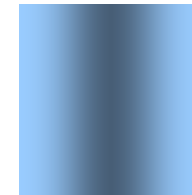
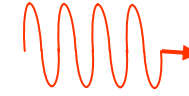
Gas,
plasma state



Cluster state



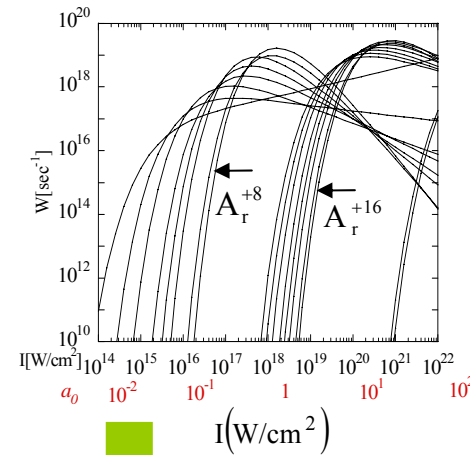
Liquid,
solid state



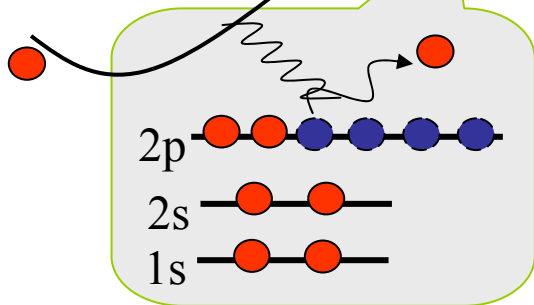
EPIC3D (Extended Particle-In Cell code)

- **Fully relativistic treatment**
 - **Second and higher order form factor** → variable particle weighting
- **Direct field form using (E,B) Potential field (A,ϕ)**
 - **Local field solver imposing continue equation for direct form (Bunneman, 1992)**
- **Variable mesh capability** → Adaptive Mesh Refining
 - **filtering technique**
- **Various configuration** → Finite Element Method
- **Particle collision and relaxation**
 - **Relativistic pairing collision model**
 - **Langevin equation in PIC**
- **Polarization, ionization/recombination process**
 - **field ionization, electron impact ionization**
 - **photo ionization, radiative recombination, three-body recombination**

Enhanced particle based integrated code (EPIC3D) for simulation of complex plasma

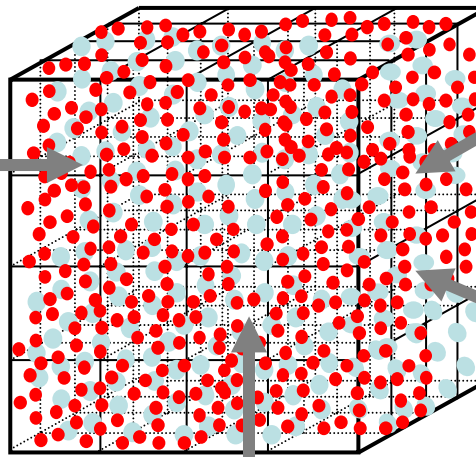


Internal atomic structure

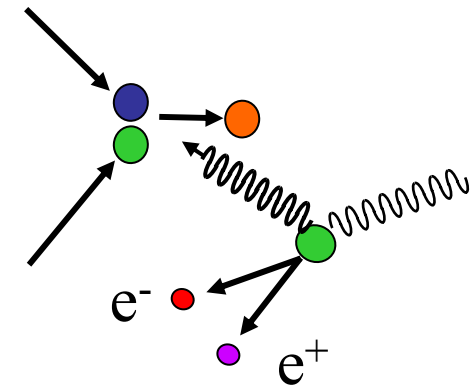
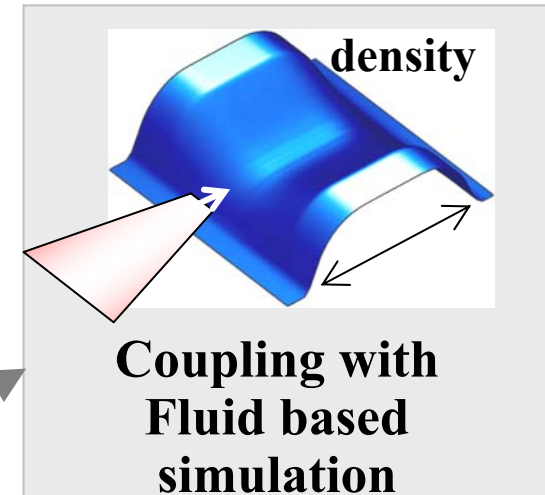


- Ionization/Recombination
- Excited state
- Atomic polarization,
- Electron attachment

3D relativistic PIC
Plasma model (E, B)



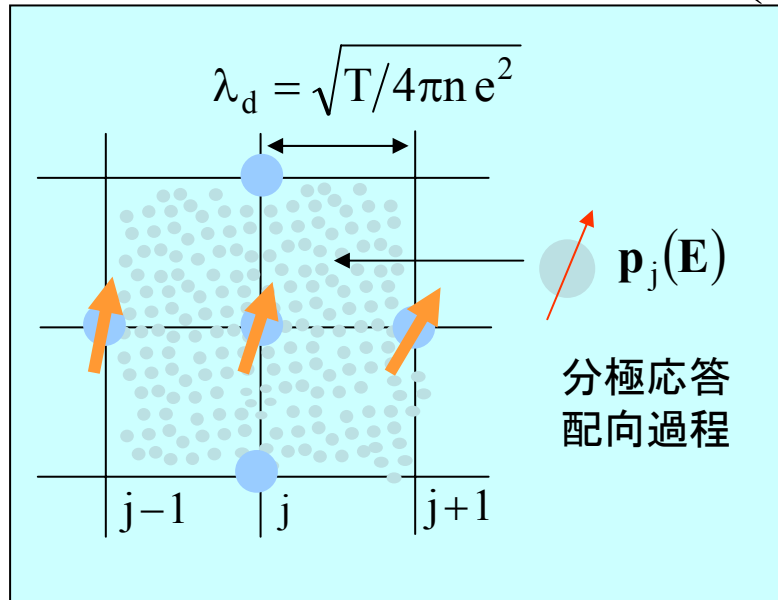
- Collisional relaxation
- Heat conduction



- Electron-positron pair creation
- Various nuclear reaction

原子・分子過程を取り入れた 拡張型プラズマ粒子手法

● Extended Particle-In-Cell (PIC) code



個別粒子としてのダイナミクス

- 分極応答・配行過程
- 解離過程・化学結合
- 電子付着・負イオン化過程
- イオン化・プラズマ化過程

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_j q_j \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \sum_j q_j \mathbf{v}_j \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{x}) = \sum_j \mathbf{p}_j \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j) \rightarrow \mathbf{J}_p(\mathbf{x}) = \partial_t \mathbf{P}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi \rho$$

$$\frac{d\mathbf{p}_j}{dt} = q_j \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v}_j \times \mathbf{B} \right) - \mathbf{R}(\mathbf{E}, \mathbf{B})$$

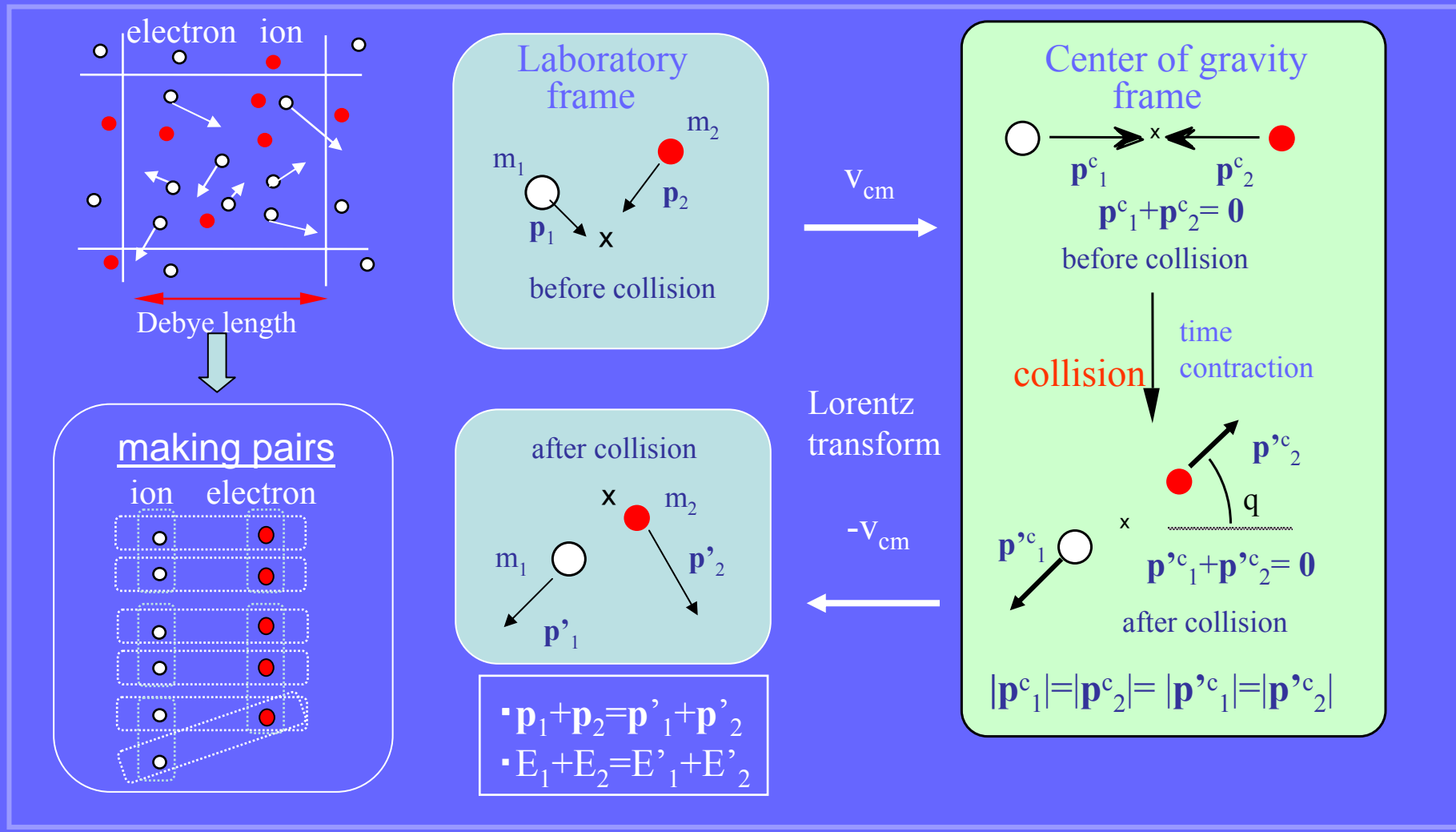
Relativistic pairing collision model

Takizuka and Abe, J. Comp. Phys. 25, 205 (1977)

→ exact energy and momentum conservation

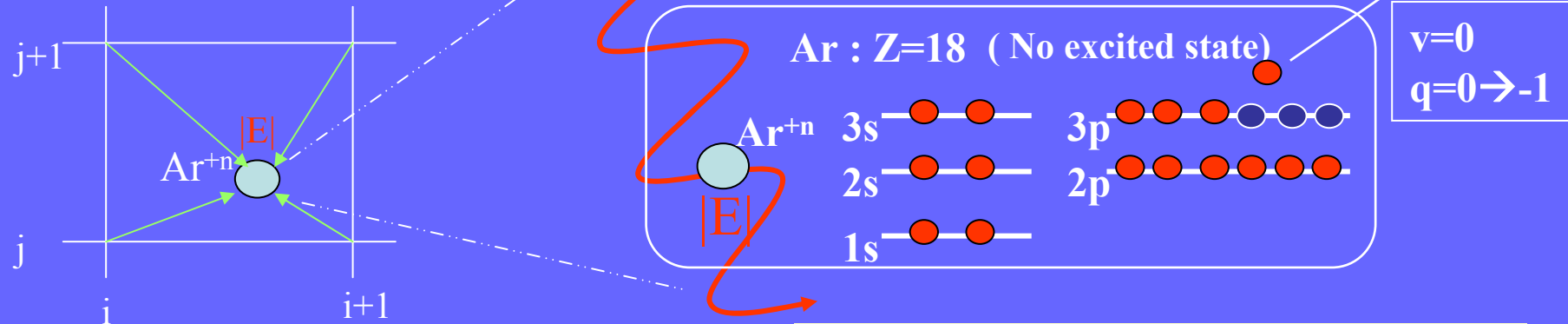
Sentoku, Mima, Kishimoto, Honda, J.Phys. Soc. Jpn. 67,4084 (1998)

→ relativistic extension



Field ionization model in particle code

Model of internal atom electronic state : nucleus and bound electrons



Ionization frequency (ADK theory)

$$W(E) = \omega_A C_{n,l}^2 f(l,m) U \left(\frac{3E}{\pi(2U)^{3/2}} \right)^{1/2} \left\{ \frac{2}{E} (2U)^{3/2} \right\}^{2n-|m|-1} \cdot \exp \left[-\frac{2}{3E} (2U)^{3/2} \right]$$

E : Field strength
 U : Binding energy (normalized)

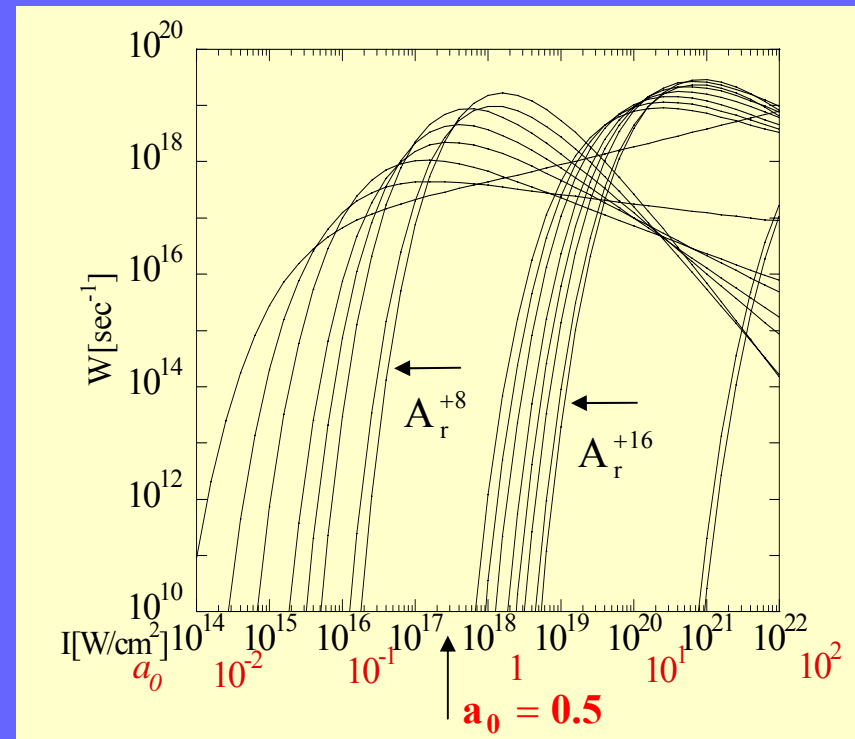
Ionization probability:

$$R_i = 1 - \exp[-W_i(E)\Delta t]$$

Condition of ionization :

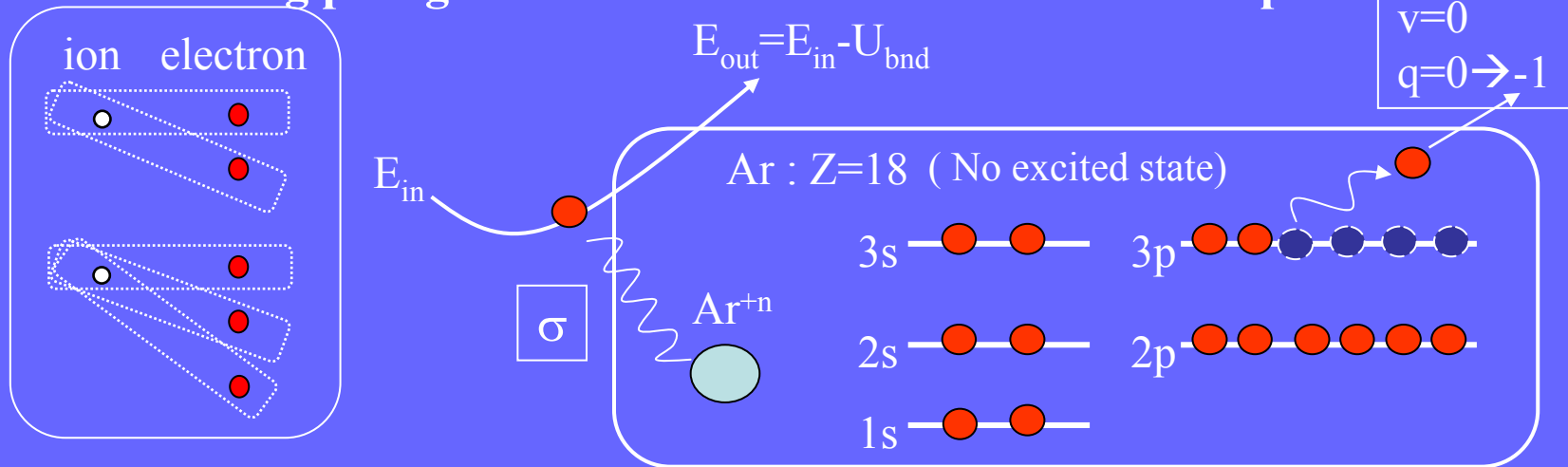
$s \in (0,1)$: random number

$R_i > s$: true \Rightarrow ionization $R_i \leq s$: false



Electron impact ionization in particle code

Model utilizing pair generation for collision and relaxation process



Binary Encounter – Bethe theory (BEB)

Kim and Rudd, Phys. Rev. A 50, 3954 (1994)

$$\sigma = \frac{S}{t + \frac{u+1}{n(q+1)}} \left[\frac{\ln t}{2} \left(1 - \frac{1}{t^2} \right) + 1 - \frac{1}{t} - \frac{\ln t}{t+1} \right]$$

$$u = U/B \quad t = E/B \quad S = 4\pi\pi_0^2 N \left(\frac{R}{B} \right)^2$$

E : incident energy

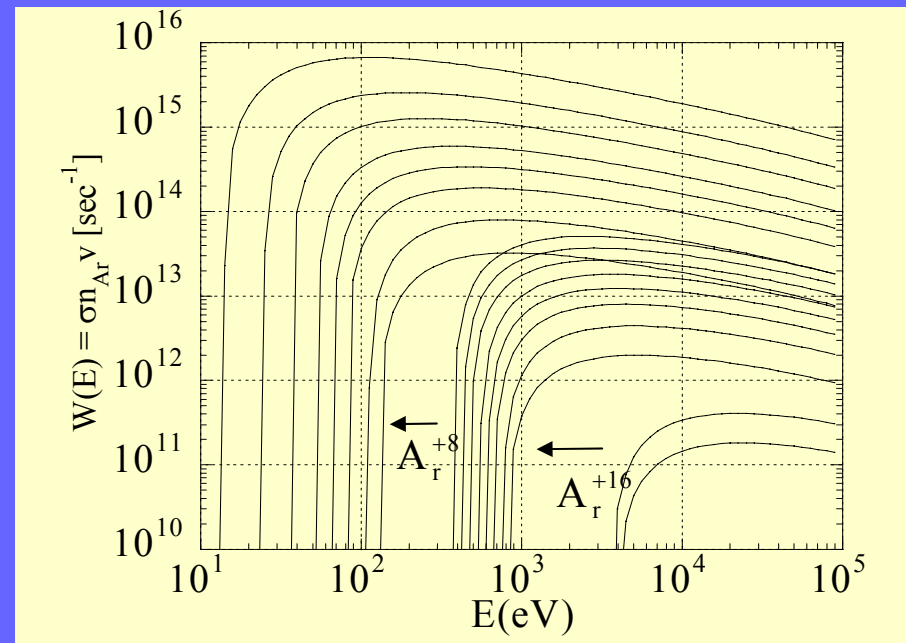
B : orbital binding energy

U : orbital kinetic energy $\rightarrow 0$

N : orbital electron occupation number

a_0 : Bohr radius,

q : net charge, R : Rydberg energy



Discharge and lightning Phenomena

Discharge streamer : transit filamentary partially ionized plasma

→ Dynamics is controlled by highly localized nonlinear space-charge ionization waves

➤ Streamer generation

Vitello, et.al. Phys. Rev. E 49, 5574 (1996)

➤ Splitting and branching and spriting

Energetic radiation

Dwyer et.al. Science 299, 694 (2003)

➤ Electro-magnetic signatures

→ X-ray and γ -ray

➤ electron acceleration

to relativistic regime

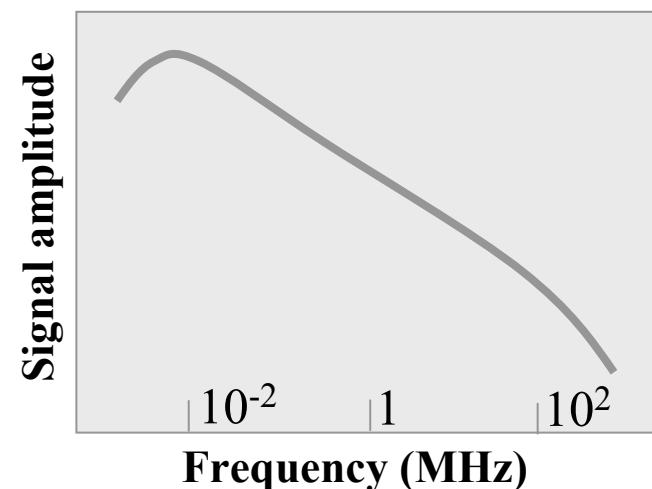
➤ 1/f characteristics of electrical lightning flash

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot n_e \mathbf{v}_e = \alpha(E)n_e - \beta n_e n_i$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \alpha(E)n_e - \beta n_e n_i$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi e(n_e - n_i)$$

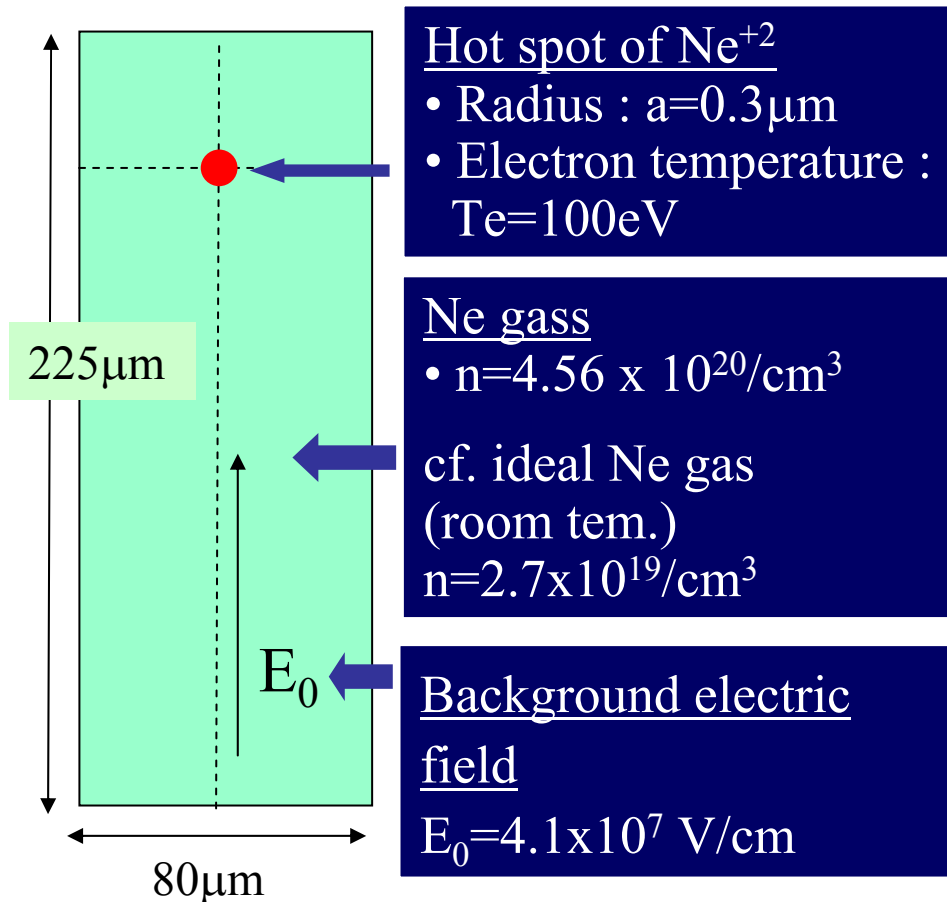
$$\mathbf{v}_e = \mu_e \mathbf{E} - D \nabla n_e / n_e$$



Lightning simulation

Ne gas : $Z=10$

Electronic state $1S^22s^22p^6$



- Background constant electric field modeling anode/cathode system

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} (\mathbf{j}^p - j_x^{ext} \hat{\mathbf{x}})$$

Periodic boundary condition
in whole direction

$$j_x^{ext} = -\frac{1}{4\pi L_x} \frac{dV}{dt} + \langle \mathbf{j}^p \rangle$$

$$dV/dt = 0 \Rightarrow j_x^{ext} = \langle \mathbf{j}^p \rangle$$

- **Extended PIC code**

- All relaxation process with Ne^{+j} ion and electron system except electron-neutral atom
- Electron impact ionization
 - No electron attachment and recombination process
- No field ionization

Sudden event of lightning simulation

Ne gas : $n=4.56 \times 10^{20}/\text{cm}^3$
cf. 10 times ideal Ne gas

$E_0=4.1 \times 10^7 \text{ V/cm}$

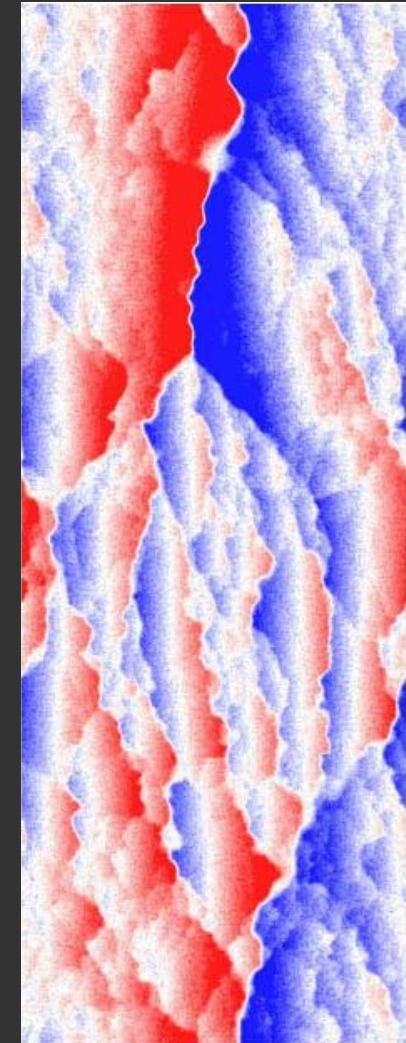
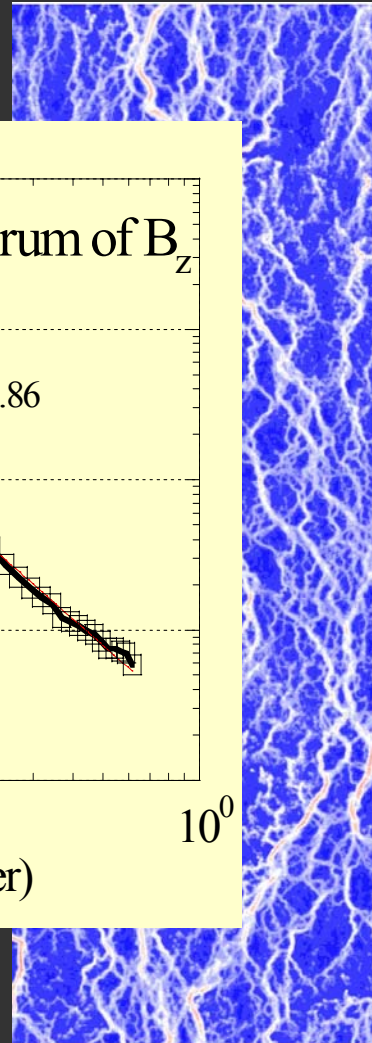
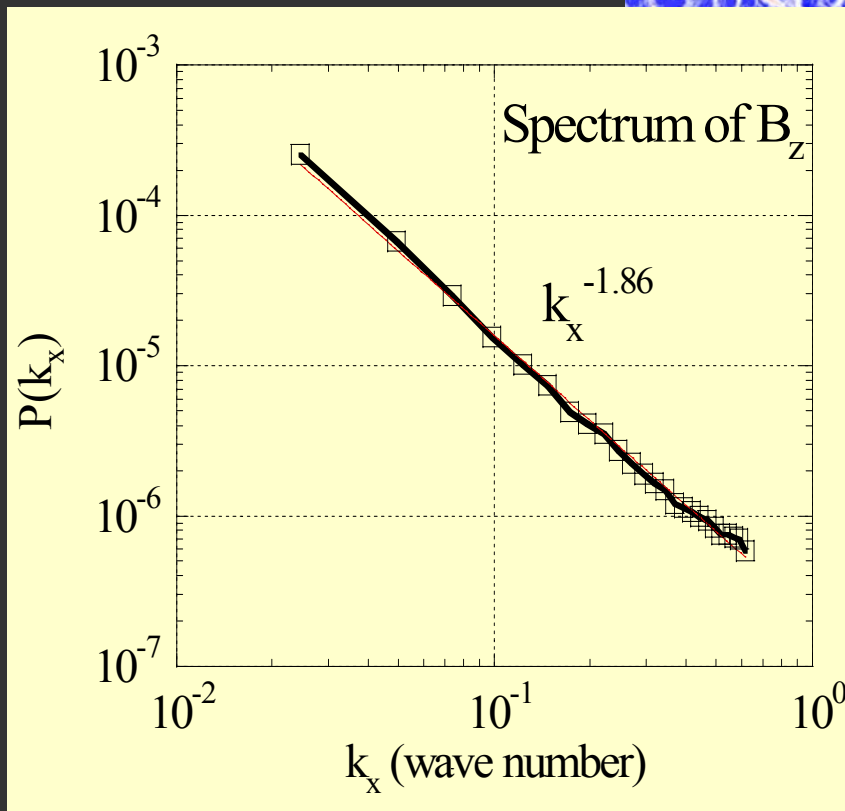
Ne ion charge density

45.3psec

J_z

45.3psec

B_z

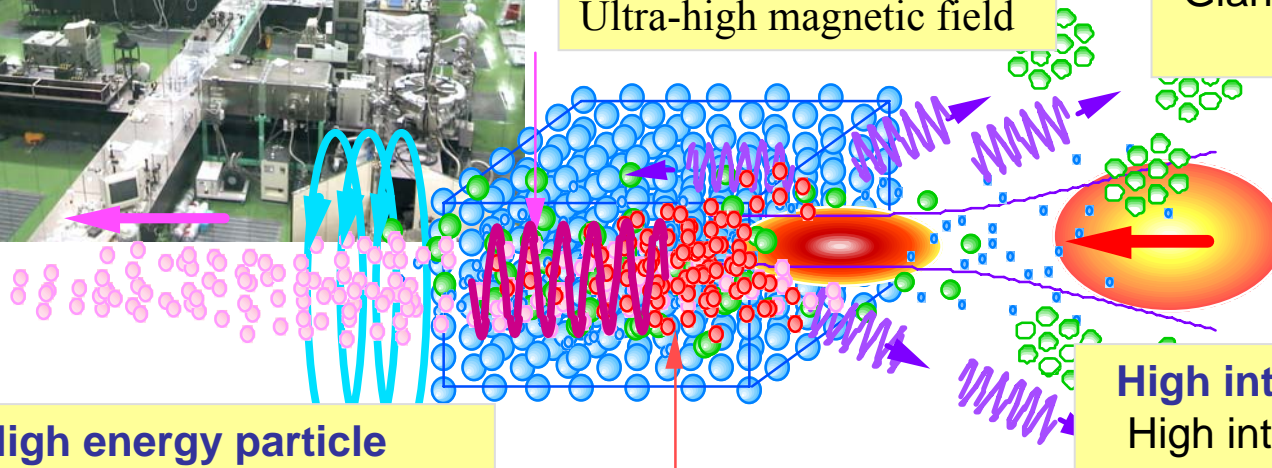


Laser-matter interaction and relativistic plasmas



High field generation
 Plasma wake field
 Particle acceleration
 and compact accelerator
 Ultra-high magnetic field

New material generation
 Nano-scale structuring
 Giant atom (like C60)
 and cluster

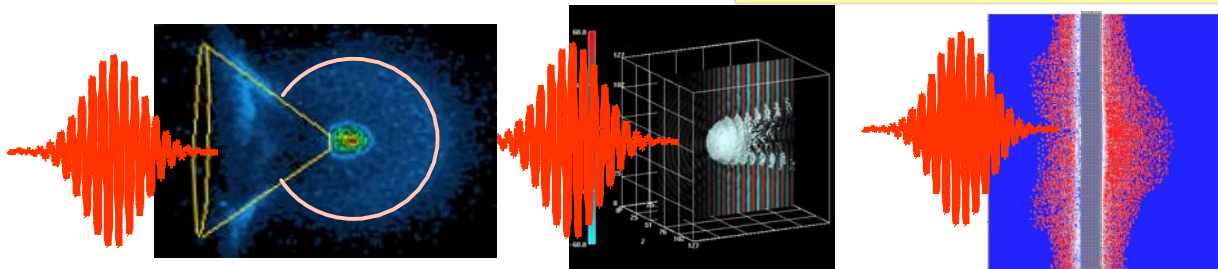
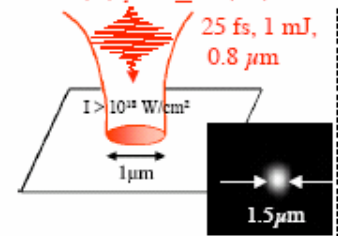


High energy particle generation
 Ultra short pulse particle beam
 Electron and ion beam
 Medical application

Ultra-High pressure state
 High pressure material state
 Strongly coupled plasma
 Cluster fusion

High intensity radiation
 High intensity X-ray and
 X-ray laser, Higher
 harmonic radiation, Larmor
 radiation

λ^3 laser system:
 relativistic intensity at 1 kHz
Albert, O., Opt. Lett. 25 1125 (2000)



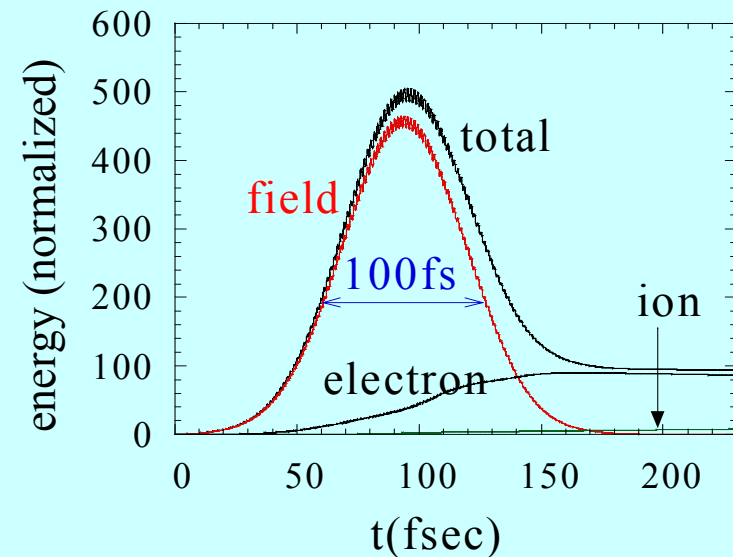
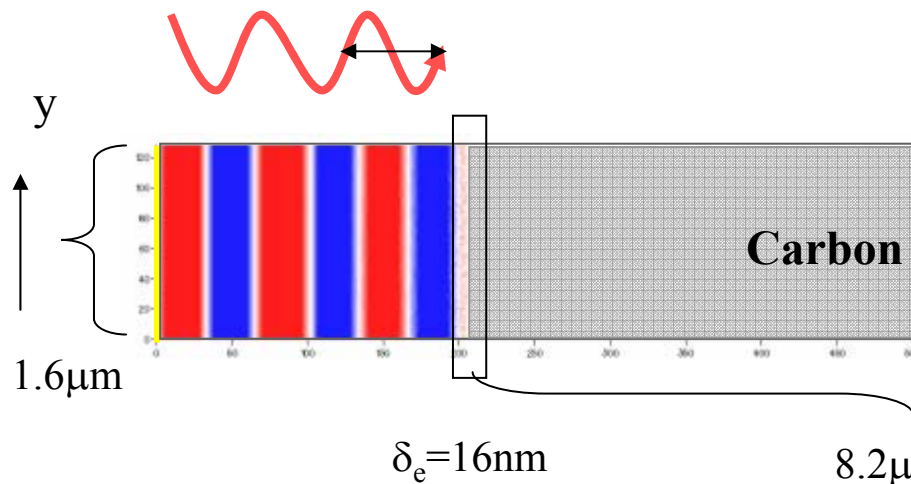
レーザー・固体薄膜(炭素)相互作用シミュレーション

- Peak power : $I=5.1 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ ($a_0=5$)
- Pulse length : $\tau_1=100 \text{fsec}$ w/o pre-pulse
- Cut-off density : $n_c=1.66 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$
- P-polarization : $\lambda=820 \text{nm}$ (64mesh)

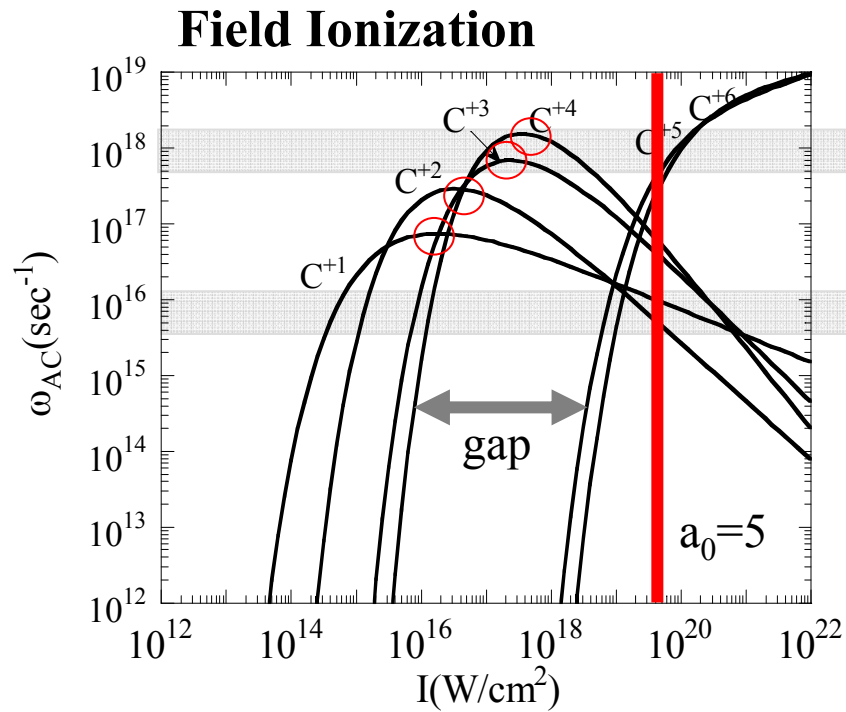
- C^{+1} : $n_1=1.12 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ ($67.5n_c$, $\omega_p/\omega=8.2$)
- C^{+4} : $n_4=4.48 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ ($270.0n_c$, $\omega_p/\omega=16.5$)
- C^{+6} : $n_6=6.72 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}$ ($404.8n_c$, $\omega_p/\omega=20.2$)

EPIC Code

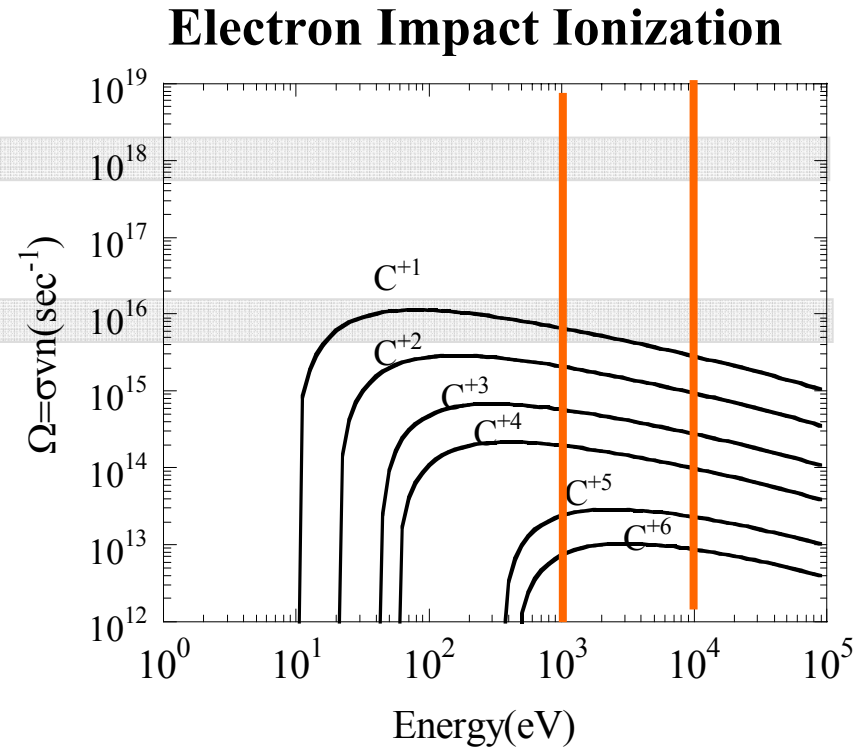
- ✓ All particle collision (e-e, e-i, i-i)
- ✓ Optical Field ionization
- ✓ Electron-impact ionization
- ✓ Current conservation scheme



Ionization Model



(a) ADK formula
Ammosov et al.,
Sov. Phys. JETP 64, 1191 (1986)

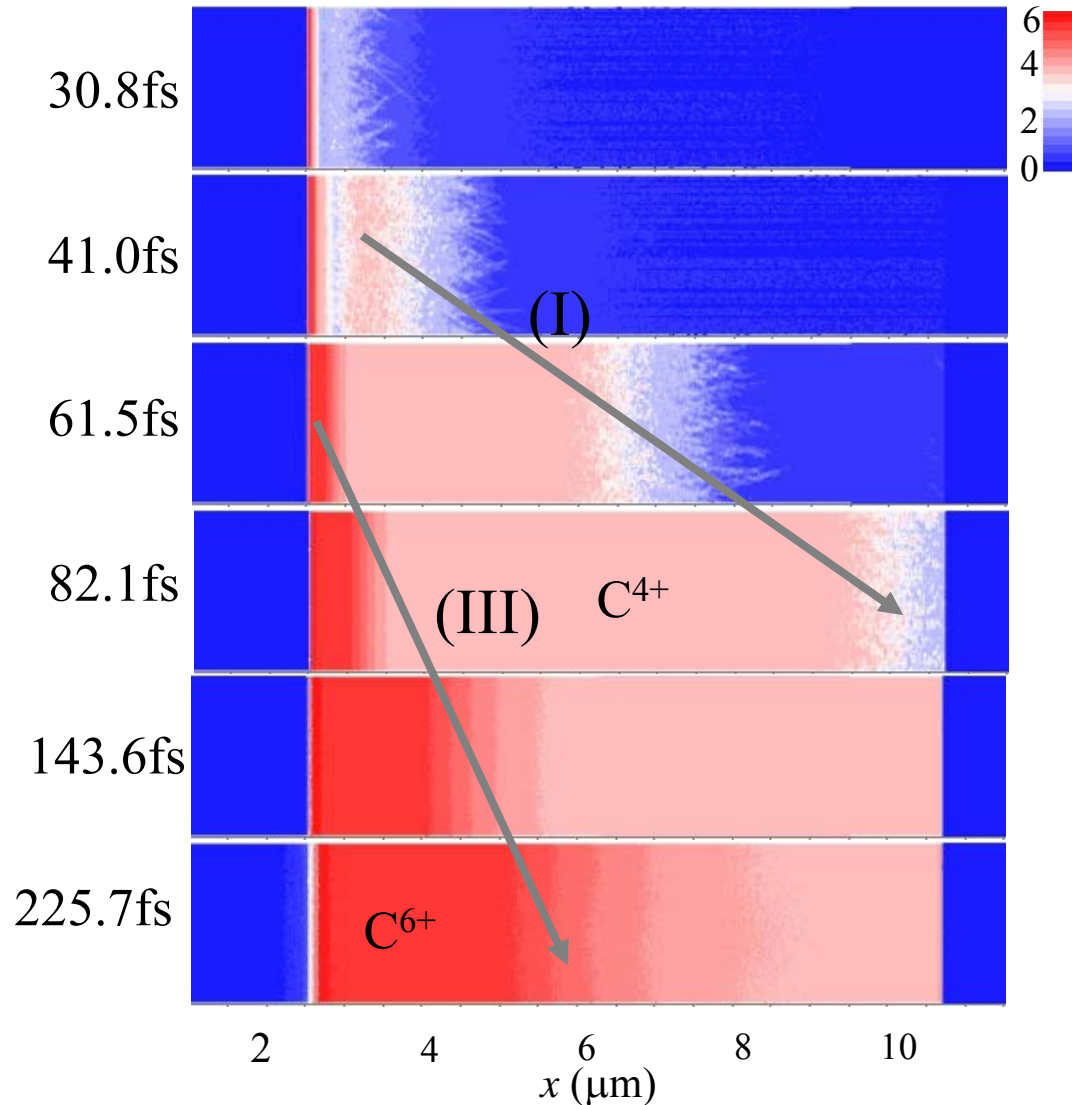


(b) BEB formula
Kim and Rudd,
Phys. Rev. A50, 3954 (1994)

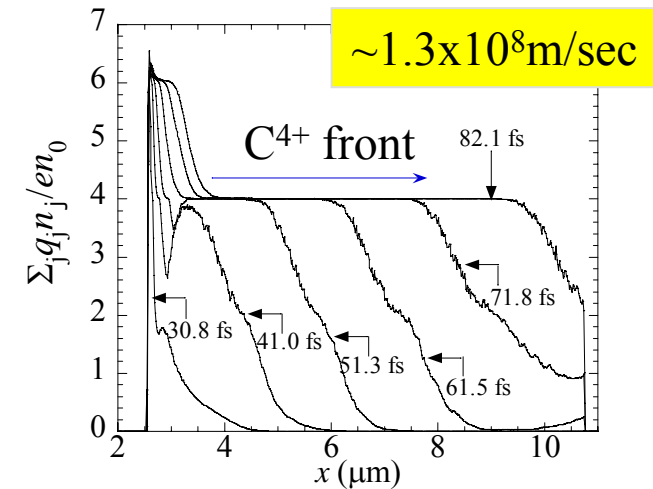
Multi-stage propagation of ionization front (I)

$I=5.1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2 (a_0=5)$

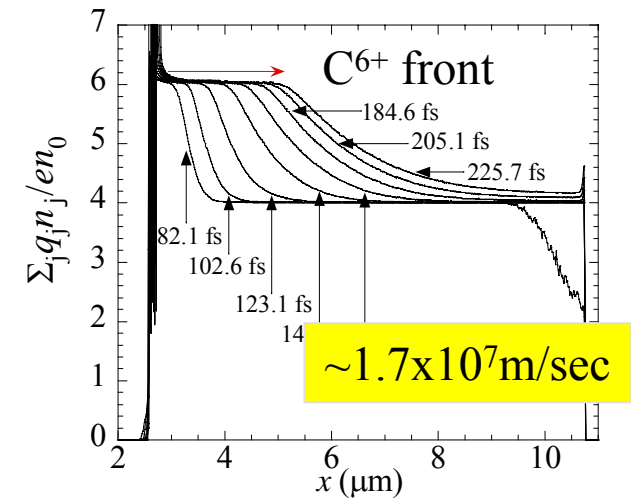
Ion charge density



$t=30.8\text{fsec} \rightarrow 82.1\text{fsec}$



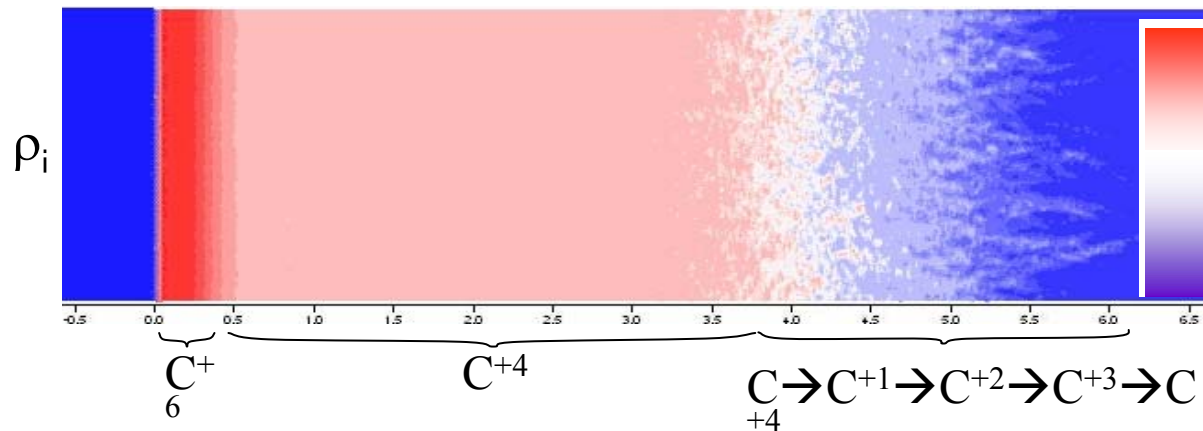
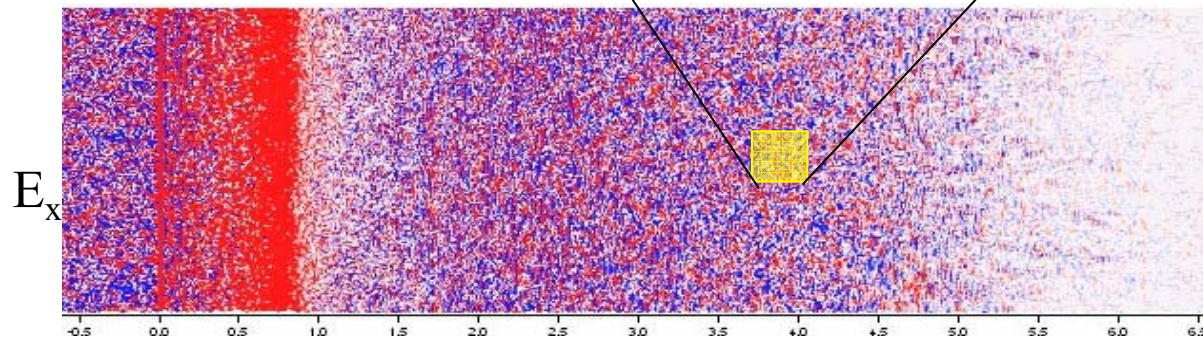
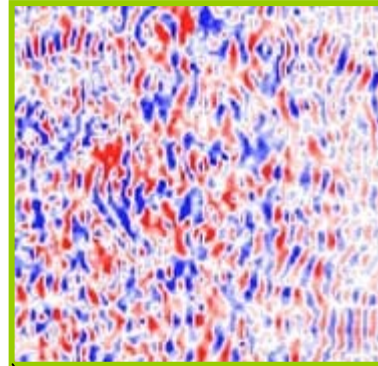
$t=82.1\text{fsec} \rightarrow 225.7\text{fsec}$



Origin of field ionization and propagation

$$I=5.1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2 (a_0=5)$$

$$t=61.5 \text{ fsec}$$



$$\lambda' \sim 56 \text{ nm}$$

$$v \sim 1.87 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

$$kv \sim 2.09 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_p^{2+} \sim 2.67 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$$

Cherenkov emission

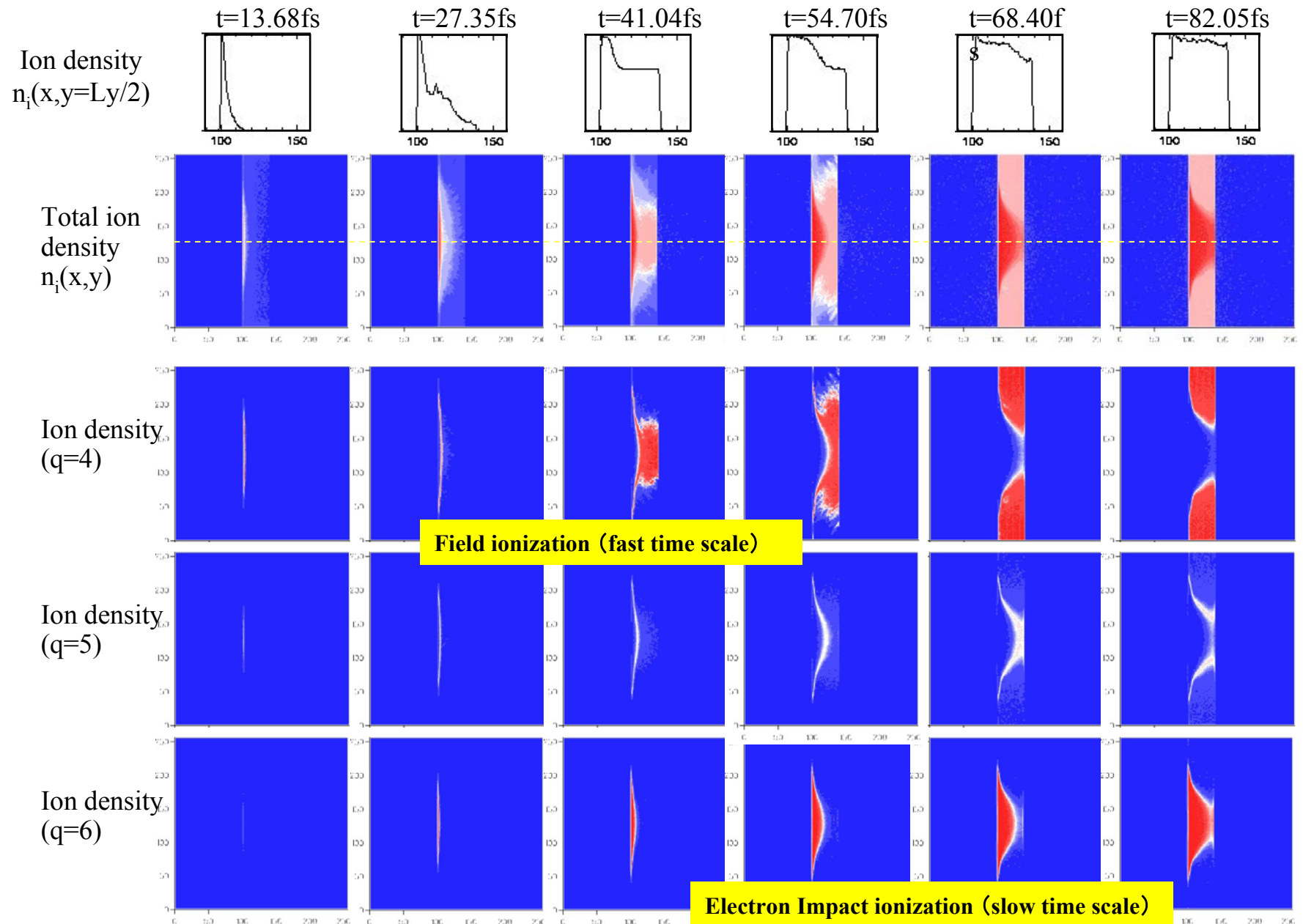
$$\omega_p \sim k v_e$$

Coherent excitation
of plasma waves

Development to plasma
wave turbulence

Triggering ionization
and
field energy loss
due to ionization

Control of internal ionization dynamics for ion acceleration



まとめと課題

原子過程(分子過程)を伴うプラズマのダイナミクス

- 理想プラズマの持つ非線形性・非局所性と相乗的に結合して、相乗的に複雑化する。
- プラズマ粒子手法を基本に、原子過程(電子衝突・場による電離過程など)・緩和過程を取り入れシミュレーションコードを開発
(プラズマからのアプローチ: 原子過程は産卵断面積でモデル化)

例題1: 放電・雷過程(初歩的)

例題2: 高強度レーザーと物質(気体・固体・クラスター)との相互作用

- 異なった時間スケール・空間スケールの物理過程が混在(マイクロとマクロ)した多階層・複合系としてのダイナミクスとしての特徴

課題:

- モデルの拡張(再結合過程、励起状態、荷電交換、分子過程など)
- よりマクロな系への繰込み・連結階層化などの検討