

プラズマの運動論に基づいた銀河団非平衡プラズマの研究

岡部 信広, 服部 誠

〈東北大学天文学教室 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: okabe@astr.tohoku.ac.jp

e-mail: hattori@astr.tohoku.ac.jp

近年の X 線観測の進展により銀河団の高温希薄プラズマは、温度分布の非一様性など、さまざまな複雑な構造をもつことが明らかになってきた。これらの構造に共通のキーワードの一つは、熱平衡状態からのずれ、言い換えれば、プラズマの速度分布関数のマックスウェル分布からのずれである。このことを考慮して銀河団プラズマ現象を研究するには、流体近似のもとでの扱いでは不十分であり、プラズマの速度分布の時間発展を記述するボルツマン方程式に立ち返る必要がある。このような研究手法をプラズマの運動論と呼ぶ。我々は現在、プラズマの運動論に基づいた銀河団プラズマの理論的研究を展開している。ここでは、その研究成果の一つである、温度勾配をもつプラズマの不安定性による自発的磁場生成の可能性について紹介する。このモデルが予言する磁場の強度は、さまざまな局面での銀河団磁場の観測値をよく説明できる。

1. はじめに

銀河団は、数十から数千の銀河の集団である。銀河団は、宇宙で最も大きな重力的に束縛された天体である。その大きさは数メガパーセクにも及び、総質量は太陽の 10^{15} 倍にも達する。銀河団から全体に広がった熱制動放射による X 線が観測されている。このことは、数千万度から約 1 億度と高温で、約 0.001 個 cm^{-3} と希薄なプラズマが銀河団全体に広がって存在していることを示している。これは銀河団プラズマと呼ばれ、その質量は銀河団内の銀河の総質量よりも数倍以上大きい。また、銀河団のいくつかは銀河団全体もしくはその一部に広がったシンクロトロン放射による電波源をもっている。これはローレンツファクターが 10^4 程度の高エネルギー電子（非熱的電子とも呼ぶ）と約 $0.1 \sim 1 \mu\text{G}$ の磁場が銀河団全体もしくは一部に広がって存在すること示している。高エネルギー電子や磁場は高温低密度プラズマの

エネルギーの 1% 以下のエネルギーしかもっておらず、銀河団プラズマの力学的進化にとってはマイナーな成分であると言える。また、磁気圧と熱的圧力の比であるプラズマベータは $10^3 \sim 10^5$ 程度の高い値となっている。このような高ベータで高温低密度プラズマは地球上の実験室では再現不可能であり、銀河団はそのようなプラズマの巨大な実験室だと言える。

銀河団内の銀河やプラズマは銀河団の総質量の約 20% 程度であり、総質量の約 80% を占める暗黒物質またはダークマターと呼ばれる見えない物質の重力の影響を受けて進化している。階層的構造形成モデルによれば、現在の宇宙の構造はより小さな構造が重力的に集まって形成、進化してきたと考えられている。銀河団は宇宙の中で最も大きな天体であるので、近傍銀河団でもその現在進行している構造形成過程が観測されることが期待される。事実、日本の X 線天文衛星「あすか」をはじめ、近年打ち上げられた欧米の Chandra

(チャンドラ) や XMM-Newton といった X 線衛星によって、その現場のスナップショットが観測されてきた。面白いことにこれら新しい発見にとって熱伝導の抑制が共通のキーワードの一つとなっている。その一つの例がチャンドラによって発見されたコールドフロントと呼ばれる銀河団プラズマの新しい構造である^{1)~3)}。コールドフロントとは高温低密度の高エントロピープラズマと低温高密度の低エントロピープラズマが接する弓状の不連続面である。これは、銀河団に密度の高いガスハローを伴う銀河団が音速程度で衝突して形成されたと解釈することができる。コールドフロントの幅はせいぜいクーロン衝突による電子の平均自由行程程度である。したがって、このような構造が維持され何例も観測されるためには、熱伝導率がクーロン衝突のみを考慮して導出された古典的熱伝導率より極めて小さな値に抑制されていなければならない。温度ムラの存在が観測されている銀河団も存在する。これは、銀河団の力学的時間より以前に起きた銀河団同士の衝突によって生じた温度ムラが現在も消えずに観測されているものと考えられている。このためには熱伝導率が古典的熱伝導率の 1/10 以下に抑制されていなければならないという観測例もある⁵⁾。また、銀河団の中心に向かって温度が周辺部の 1/2~1/3 に単調に低下する大局的温度勾配の存在が観測されている銀河団も存在する。これらは比較的孤立して進化を遂げた銀河団であると考えられている。このような銀河団のプラズマの温度・密度分布を輻射冷却と熱伝導加熱が釣り合った力学平衡モデルで説明するためには、熱伝導率が古典的熱伝導率の 1/3 程度である必要があることが指摘されている⁴⁾。またこのほかにも、低電離の鉄輝線の不在による冷却流モデルの破綻や、銀河団中心の巨大電波銀河の電波ロープと銀河団プラズマの相互作用といった、今までの銀河団の描像を大きく塗り変える観測的発見が相次いでいる^{6), 7)}。銀河団プラズマは、もはや静的な描像ではとらえきれない

存在であり、熱的にも力学的にも非平衡で非線形な構造で満ちあふれている。

上記のように近年の X 線観測により明らかになった銀河団プラズマを特徴づけるキーワードの一つは、熱平衡状態からのずれおよび熱伝導度の抑制である。非平衡プラズマを特徴づける基本的物理量はプラズマの速度分布関数のマックスウェル分布からのずれである。熱伝導は電子の運動エネルギー流速であり電子の速度の 3 次のモーメントである。マックスウェル分布は速度の偶関数であるから 3 次のモーメントは恒等的にゼロである。したがって、熱伝導の問題は必然的に速度分布関数のマックスウェル分布からのずれの部分と関連する。速度分布関数の熱平衡分布からのずれを考慮して銀河団プラズマ現象を研究するには、流体近似のもとでの扱いは不十分であり、直接プラズマの速度分布の時間発展を記述するボルツマン方程式に立ち返る必要がある。このような研究手法をプラズマの運動論と呼ぶ。我々は現在、プラズマの運動論に基づいた銀河団プラズマの理論的研究を展開している。ここでは、その研究成果の一つである、温度勾配をもつプラズマの不安定性による自発的磁場生成の可能性について紹介する。

2. 温度勾配があるプラズマ中での電子速度分布関数

温度勾配をもつプラズマ中では常に熱流が流れるため平衡状態になく、電子の速度分布関数はマックスウェル分布からずれた非平衡速度分布関数になる。ここでは、背景磁場をもたないプラズマが圧力平衡にあるが温度勾配が存在し、熱流 q_e が温度勾配を下る方向に流れるという最も簡単な状態を考える。マックスウェル分布関数からのずれ Δf は図 1 に示したような形になる。横軸は温度勾配に平行な速度成分 $v_{||}$ である。局所的な粒子数保存則およびエネルギーの保存から 0 次および 2 次のモーメントがゼロであるように $v_{||}$ の奇関

数になっている。プラズマの電荷中性を保つため、電流はゼロでなければならない。この条件から速度の1次のモーメントがゼロになるように $v_{||} > 0, v_{||} < 0$ の各領域で Δf が正負両方の値をもち $v_{||} > 0, v_{||} < 0$ の各領域でそれぞれ1次のモーメントがゼロになるようになっている。速度の3次のモーメントのみが有限で負の値をもち熱流が $q_e = \langle m_e v^2 v_{||} \Delta f / 2 \rangle < 0$ で与えられる。ここで m_e は電子の質量である。図1から、熱伝導は主に低温方向に運動している速度の大きな少数の電子により運動エネルギーが運ばれる現象であることがわかる。

このような非平衡速度分布関数をもつときのプラズマの運動論に基づいた線形不安定性解析により、磁場を伴ったプラズマ波が不安定性により成長することが以前から知られていた¹¹⁾。以下では、はじめにこの結果を導いた人たち (Ramani と Laval) の頭文字をとって RL 不安定性と呼ぶことにする。RL 自身により、RL 不安定性により励起された波が電子と相互作用することで熱伝導の抑制に参与している可能性が指摘されていた。しかし、線形不安定性の物理機構、非線形サチュレーションの物理機構は不明であった。次の節に示すように我々は不安定性の物理機構が本質的にワイベル (Weibel) 不安定性と等価であることを示した。ワイベル不安定性は、宇宙における磁場生成の物理機構の一つとして近年再び注目を集

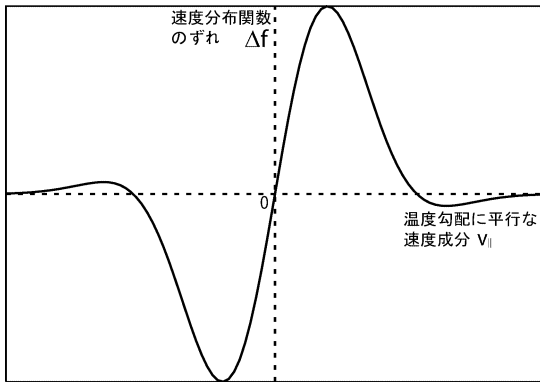


図1 熱流を起因とする速度分布関数のずれ

めている現象である。非線形段階の発展についても比較的研究が進んでいる。ワイベル不安定性との等価性が示されたことで、RL 不安定モードの実在性の確度が増ただけでなく、これまでワイベル不安定性に対してなされてきた研究結果を RL 不安定性に適応することが許され現実への応用まで含めた RL 不安定性の研究が急速に進展しようとしている。

3. ワイベル不安定性

次節で説明するように RL 不安定性は本質的にワイベル不安定性と等価である。ここでは、まだ天文業界では馴染みの薄いワイベル不安定性について解説する。ワイベル不安定性とは、プラズマが温度非等方性をもつとき、電子の軌道を曲げて速度分布の等方化を図るために磁場の波が生成されるというプラズマ不安定性である¹²⁾。この不安定性のメカニズムについて簡単に紹介する¹³⁾。図2の左側に初期摂動磁場の強さを円の大きさで表した。初期状態として、摂動磁場の波数ベクトルに垂直方向のみに電子が運動している場合 (Case

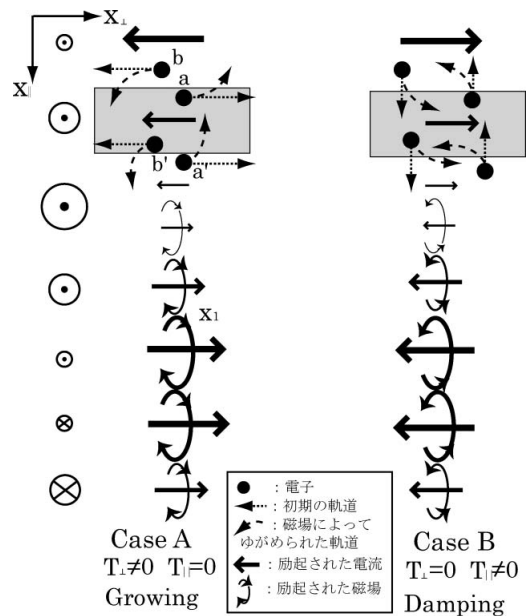


図2 ワイベル不安定性

A) と、平行方向のみに運動している場合 (Case B) を考える. 電子の軌道は摂動磁場の存在によって歪められる. ここで Case A の灰色のボックス内に着目すると, 電子 a と a' では電子 a' の方がよりきつく灰色のボックス内に入ってくるために, 正味, 右向きの運動量がボックス内に輸送されることになる. つまり, 左向きの電流が生じるのである. また同様に, 電子 b と b' に着目すると, 左向きの運動量がボックス内から奪われてしまうため, ボックス内では左向きの電流が生じる. したがって, 灰色のボックス内では正味左向きの電流が生じることになる. このようにして生じた電流分布を矢印を付した太線で表した. 電流が生じるとアンペールの法則により, その周りに磁場が生じる. 点 x_1 に着目すると, 上向きの磁場の方が下向きの磁場よりも強さが大きいため, 正味上向きの磁場が励起される. したがって, 電子の運動によって励起される磁場は摂動磁場を強める方向であり, 摂動磁場が成長することがわかる. 生成された電流分布の性質から成長する磁場の波は定在波であることもわかる. 反対に Case B の場合, 図に示したように Case A とは逆向きの電流分布が生成され, 摂動磁場は弱められる. 一般の場合, Case A と B の重ね合わせで記述できるため, 波数ベクトルに垂直方向の温度が平行方向の温度より高くなった場合に磁場の波が成長するのである.

4. RL 不安定性の物理機構

RL 不安定性の物理機構は長年の間明らかにされなかった. 筆者の一人服部はこの問題に 5 年前から挑戦し続けていた. 3 年前からもう一人の筆者岡部がこの研究に参加した. その後 1 年以上にわたって二人でいろいろな意見をぶつけ合って時には吐き気がするほど考え続けた. ちょうど昨年 1 月のある日に次のことに気づいて一気に話が進んだ. RL 不安定性の基本は, 速度分布関数のマックスウェル分布からのずれ Δf の存在であ

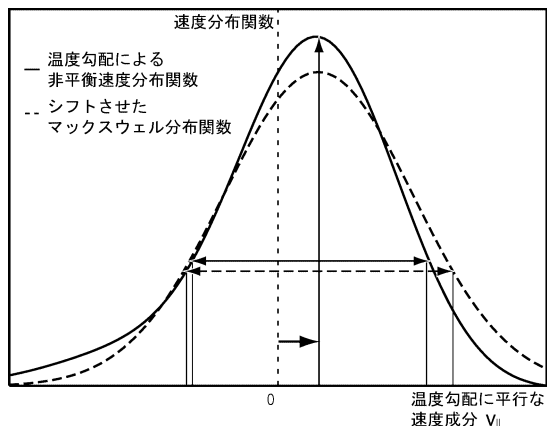


図3 温度勾配による非平衡速度分布関数

る. そのために Δf の性質のみから RL 不安定性を理解することに終始していた. しかし, この日は初めてマックスウェル分布と Δf を合成した全速度分布関数の性質を調べてみた. すると結果は図3の実線で示したようになった. さらに比較のために, マックスウェル分布のみをピークを同じだけシフトさせて描いてみた. 結果が図3の点線である. この図を見て長年の問題が一気に解けた. 温度勾配に垂直方向はマックスウェル分布のままであるから, 点線のグラフは温度勾配に垂直方向の分布関数と見なせる. 両者を比較すると, 実線のほうが幅が狭い. 分布関数の幅は温度を表している. したがって, 実線のピークで温度勾配をさかのぼる方向に運動している観測者にとって, 温度勾配に平行方向の温度が垂直方向の温度より低い, 温度非等方性を伴ったプラズマとして観測される. そこでワイベル不安定性の分散関係式に期待される温度の違いを代入したところ, プラズマ運動論に基づいた線形解析から導かれた RL 不安定性の成長率を見事に再現した. ワイベル不安定性が起こるのは波数ベクトルと垂直方向の温度が平行方向の温度より高いことが本質であったことから, 波数ベクトルが温度勾配に平行に近いときのみ RL 不安定性で波が成長することも理解できる.

二つの不安定性で励起される波の性質の違いも

図2を用いて説明ができる。ワイベル不安定性で励起される波が定在波であるのに対して、**RL**不安定性で励起される波は温度勾配をさかのぼる方向に伝播する波である。 $v_{||}$ のピークで運動する観測者にとってワイベル不安定性と同様励起される波が定在波であるので、実験室系の観測者にとっては速度分布のピークのずれの分の位相速度で温度勾配をさかのぼる方向に伝播する波として観測されるのである。実際、線形解析から求められた位相速度とこのような議論で求められた位相速度が一致する。**RL**不安定性で励起されるモードは、励起される磁場が波数ベクトルと温度勾配の作る面内にあるか、その面に垂直であるかによって二つの独立なモードに分類される。後者のモードでは、波数ベクトルと温度勾配が平行でないとき励起される波は縦波電場成分をもつ。これはピークで運動する観測者から実験室系へローレンツ変換することで実験室系で生じる $v \times B$ 電場が波数ベクトル成分をもつことから理解できる。このように**RL**不安定性の物理機構は、ローレンツ変換を受けたワイベル不安定性としてほぼ完全に理解できることが明らかになったのである。

全速度分布関数の性質から**RL**不安定性の物理機構が理解できることに気づいてから1カ月程度は連日二人で夢中になって議論を展開し、内容を深めていった。なかでも山形大学で滝沢元和氏らと行った議論とその行き帰りの車で行った議論ではいくつかの基本的発展があり、忘れられない楽しい思い出となっている。

5. 非線形発展

上記の機構によって線形成長する磁場の強度は、どこまで強くなるのか、最終的な磁場の配位はどのようなものになるのか、といった非線形発展の様子が明らかにならないと現実の銀河団の観測量との比較を行うことができない。これに定量的に答えるためには、プラズマ粒子シミュレ-

ーションと呼ばれる手法で直接粒子の速度分布と場の発展を追跡する必要がある。現在のところ我々は、おおまかに、熱的速度をもつ電子のラーマー半径が不安定性の最大成長率のもつ波の波長と等しくなるほど波の磁場が強くなったときサチュレーションが起きるだろうと推測している。磁場のこれより弱いときは電子は磁場による軌道の変化を若干受けるものの大多数の電子はトラップされずほとんど自由に動き回っている。一方、磁場の強さがこれより強くなると、大多数の電子が局所的な磁場にトラップされる。以降も磁場の成長が起これると、誘導電場によって電子のベータトロン加速が効率良く起きて磁場のエネルギーが電子の運動エネルギーに転換されてしまう。したがって、これ以上は磁場の成長が起きないと考えられる。

サチュレーション後の磁場の進化はワイベル不安定性のシミュレーション結果から、より大きな構造に進化すると期待される¹⁴⁾。ワイベル不安定性によって電流ビームの波が励起されるが、同じ向きの電流は引き合い、逆向きは反発し合うことから、同じ向きの電流ビームがしだいに合体し大局的な電流へと進化していく。これに伴って、磁場もより大きな構造へと進化するのである。このようにして温度勾配をもつプラズマ中では、温度勾配に垂直方向の成分をもつ磁場が自発的に生成されることが期待される。しかしながら、どの程度の相関長まで発展するのか、ワイベル不安定性での非線形発展の結果をそのまま**RL**不安定性の場合に適用できるかなど、基本的な未解決問題が山積している。対象となるダイナミックレンジが非常に広いため粒子シミュレーションのみに頼った直接的方法だけでは限界があり、新たな研究方法の開発も必要とされる。

また、この分野で国立天文台の加藤恒彦氏が全く別の動機でワイベル不安定性の非線形発展の研究を展開していたことは驚くべき偶然であり、またそのお陰で我々の研究をここまで具体的に発展

させることができた。

6. 銀河団プラズマへの応用

(1) コールドフロントに沿った方向の磁場

チャンドラによって発見された接触不連続面であるコールドフロントは音速程度で動いている。このとき、熱いプラズマと冷たいプラズマの相対的な流れが生じてケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定性が引き起こされることが期待される。その結果、コールドフロントの弓状の形がくずされてしまうことが予想されるが、実際にはきれいな弓状をしたままである。これは KH 不安定性が抑制されていることを意味しており、コールドフロントに沿った方向に $10 \mu\text{G}$ 程度の磁場が存在すれば観測された現象を満たすことが指摘されている²⁾。仮にこの見積もりが正しいとすると、電波から見積もられた磁場の強さよりも 1 桁大きい。

一方、温度勾配による磁場生成モデルに基づき、温度勾配の観測値などから、生成される磁場を見積もってみると、約 $5 \mu\text{G}$ 程度の磁場がコールドフロントに垂直方向に存在することがわかった^{8), 10)}。このように、ミクロスコピックなプラズマの運動論より得られた磁場の強さと特徴が、マクロな流体力学的観点から見積もられた磁場の特徴に近いことは興味深い。

(2) 電波ハローから見積もられた $0.1 \sim 1 \mu\text{G}$ の磁場

同様に、X 線観測から得られた非一様温度分布から磁場の値を見積もることができる。特に、電波ハローをもち、詳細な温度分布が観測されている三つの銀河団 COMA^{15), 16)}, A2163¹⁷⁾, A754⁵⁾ に対して本モデルに基づく磁場の強さを大雑把に見積もった。結果は COMA; $0.1 \sim 0.3 \mu\text{G}$, A2163; $0.5 \mu\text{G}$, A754; $0.2 \mu\text{G}$ と、電波ハローから見積もられた値の COMA; $0.5 \mu\text{G}$ ¹⁸⁾, A2163; $0.9 \mu\text{G}$ ¹⁹⁾, A754; $0.3 \mu\text{G}$ ²⁰⁾ に近いことがわかった^{9), 10)}。このモデルの特筆すべき点は、磁場のエネルギーがプラズマの熱エネルギーと等分配になっておらず、4 桁近

く小さいことも自然に説明できることである。

7. さいごに

本稿では、プラズマを運動論に基づいて展開している我々の銀河団プラズマの研究の一部を紹介した。温度勾配が存在するプラズマでは、ワイベル不安定性と等価の物理機構により磁場が自発的に生成されることを示した。この機構は、銀河団のさまざまな局面での磁場の起源となりうることを紹介した。生成される磁場の主な方向が温度勾配に垂直方向であることから、熱伝導度が古典的熱伝導よりも小さくなり、自己調節する可能性も指摘できる^{8)~10)}。しかしながら、本分野の研究はまだ端緒が開かれた段階に過ぎず前節までに述べたように今後のさらなる基礎研究が必要である。Astro-E2 の打ち上げを来年に控えた今、ここで紹介したアプローチによる研究だけでなく、すばる望遠鏡による銀河団の暗黒物質分布の直接測定や流体あるいは MHD シミュレーションを用いた銀河団プラズマの形成・進化の研究など銀河団のさまざまな切り口からの研究が今後ますます多様で内容豊かな世界に発展することと確信しており、銀河団は今後が非常に楽しみな研究分野である。

謝 辞

本研究では、国立天文台の加藤恒彦氏、藤田裕氏、山形大学の滝沢元和氏、山形短期大学の犬野 寛氏、東北大学の飯島雅英氏、東京大学の星野真弘氏、コールドフロント発見者の一人、A. Vikhlinin 氏の皆様には、数々の有意義なコメントをいただきたいへん感謝をしております。また、東北大学 21 世紀 COE プログラム「物質階層融合科学の構築」および文部科学省科学研究費基盤 (A)-(2) 課題番号 16204010 の援助に感謝します。

参考文献

- 1) Markevitch M., et al., 2000, ApJ 541, 542
- 2) Vikhlinin A., Markevitch M., Murray S. S., 2001a, ApJ 549, L47
- 3) Vikhlinin A., Markevitch M., Murray S. S., 2001b, ApJ 551, 160
- 4) Zakamska N. L., Narayan R., 2003, ApJ 582, 162
- 5) Markevitch M., et al., 2003, ApJ 586, L19
- 6) 藤田 裕, 2002, 天文月報 95, 418
- 7) 牧島一夫, 池辺 靖, 2004, 天文月報 97, 6
- 8) Okabe N., Hattori M. 2003, ApJ 599, 964
- 9) Okabe N., Hattori M., 2003, Proceeding in “The Riddle of Cooling Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies” URL: <http://www.astro.virginia.edu/coolflow/>
- 10) Okabe N., Hattori M., 2004, Proceeding in “X-Ray and Radio Connections” URL: <http://www.aoc.nrao.edu/events/xraydio/>
- 11) Ramani A., Laval G., 1978, Phys. Fluids 21, 980
- 12) Weibel E. S., 1959, Phys. Rev. Lett. 2, 83
- 13) Fried B. D., 1959, Phys. Fluids 2, 337
- 14) Lee R., Lampe M., 1973, Phys. Rev. Lett. 31, 1390
- 15) Arnaud M., et al., 2001, A&A 365, L67
- 16) Briel U. G., et al., 2001, A&A 365, L60
- 17) Markevitch M., 2001, ApJ 563, 95
- 18) Giovannin G., et al., 1993, ApJ 406, 399
- 19) Feretti L., et al., 2001, A&A 373, 106
- 20) Bacchi M., et al., 2003, A&A 400, 465

A Study Based on Plasma Kinetic Theory of Non-Equilibrium Plasma in Clusters of Galaxies

Nobuhiro OKABE and Makoto HATTORI
Astronomical Institute, Tohoku University

Abstract: It has been unveiled by recent X-ray observations that the low-density and high-temperature plasma in clusters of galaxies have various unexpected and complicated structures, e.g., inhomogeneous temperature distributions. One of the keywords with respect to those structures is the deviation from the thermal equilibrium state, in other words, the deviation of the velocity distribution function from the Maxwell-Boltzmann. The study of the plasma phenomena in clusters of galaxies considering that, cannot be treated in the framework of the hydrodynamic approximation but need to be treated by the Boltzmann equation which describes the time evolution of the velocity distribution function. That approach is called “the plasma kinetic theory.” We introduce one of our recent results of studies of cluster plasmas which have been carried out based on the plasma kinetic theory. The magnetic fields are generated by the plasma microscopic instability in the plasma with temperature gradients. Field strengths predicted by this mechanism agree with the observed field strengths in the various sates of clusters of galaxies.