

ペルセウス座分子雲に見る マルチスケールな星間磁場構造



土井 靖 生

〈東京大学 大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

e-mail: doi@ea.c.u-tokyo.ac.jp

BISTRO（ビストロ）サーベイを通じて明らかになった、ペルセウス座分子雲内外の磁場形状について紹介する。分子雲内部の星形成領域を観測すると、磁場の形態は、約1パーセクの空間スケールを境にその様相を大きく変える。星形成活動において重要な役割を果たすと考えられる星間物質フィラメントによって、磁場は曲げられ、あるいはフィラメント内部に引きずり込まれている様子が伺える。一方で理論計算との比較から、フィラメントの収縮を磁場が支え、防いでいる様子が示唆される。この観測を通じ、星形成活動における星間ガスと磁場との相互作用の一端が見えてきた。

1. BISTRO プロジェクトの磁場測定

BISTRO（ビストロ）は、近傍星形成領域中の磁場構造の観測プロジェクトであり、観測には地上大口径電波望遠鏡であるJCMTを用いる [1]。JCMTの空間分解能は波長850 μm で14秒角であるが、電波干渉計を用いれば、さらに高い空間分解能で磁場を観測することができる。しかしながら干渉計による観測では、空間的に広がった輻射成分に対する感度が得られない。人工衛星を用いた観測からは、地上望遠鏡ではカバーできない全天の磁場分布を知ることができる。しかしその空間分解能は限定的であり、電波干渉計の観測との間に空間周波数上の観測ギャップが生じる。その観測ギャップはおよそ10秒角～10分角であり、これはペルセウス座分子雲の距離（300パーセク）で約0.01パーセク～1パーセクに相当する。

BISTROはこの空間ギャップを埋める観測を行うことで、数十パーセクから0.01パーセク以下の空間スケールの磁場構造の違いを連続的に明らかにする（図1参照。図1（a）、（b）は干渉計の観測データ、図1（c）がBISTROの観測データ、

図1（d）は人工衛星（プランク衛星）の観測データである）。BISTROの観測の結果、分子雲の内部で星間ガスがフィラメント状に収縮する際に、周囲の磁場を引きずり込んで複雑に曲げている様子が明らかとなってきた [2-4]。

以下ではBISTROの明らかにした磁場構造の変遷を、大スケール→小スケールの順に見ていく。

2. ペルセウス座分子雲周囲の磁場構造

図1（d）に示すのは、ペルセウス座分子雲（約20パーセク×10パーセク）の全体像である。分子雲の柱密度の分布をグレースケールで示している。図の左右方向（東西方向）に、やや細長く伸びた分子雲の分布が見てとれる。

同図に黒線で示すのが、分子雲を貫く磁力線の空間分布である。太線で示すのが可視偏光観測による磁力線の向き [7]、細線はプランク衛星の観測した磁力線の向き [9] である。プランク衛星による様々な分子雲の観測から、磁場は多くの場合、細長く伸びた分子雲を垂直に貫くように分布することが知られている [9]。ペルセウス座分子

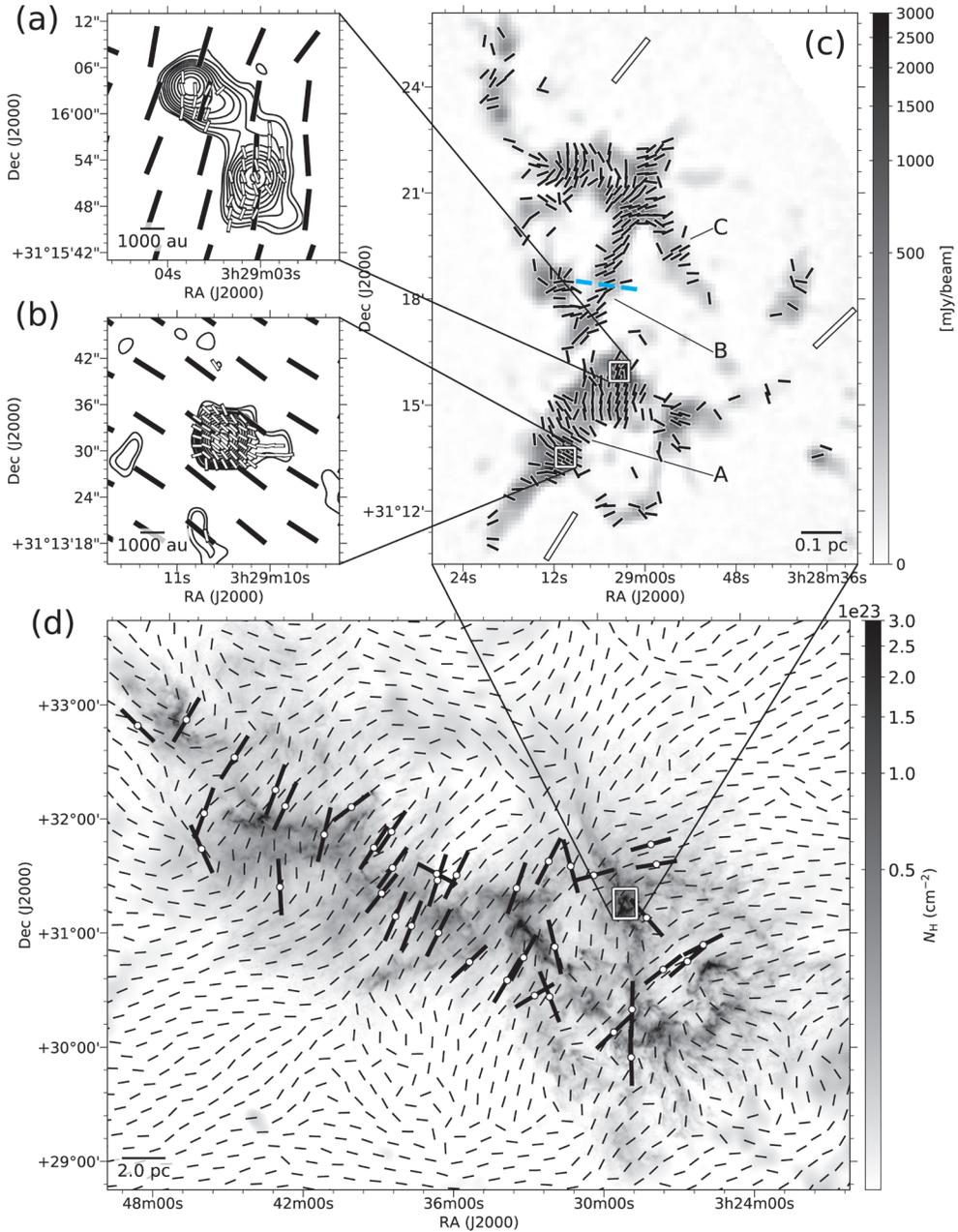


図1 ベルセウス座領域のマルチスケール磁場構造 [2-4]. (a): SVS 13A · 13B, (b): IRAS 4A, (c): NGC 1333, (d): ベルセウス座分子雲の各領域を示す. 各図に示す磁場はそれぞれ, プランク衛星の観測した大規模磁場 [5]: (d) の細い黒線分と (c) の太い白線分, JCMTで観測した小規模磁場 [2]: (a), (b), (c) の黒線分, 干渉計 (CARMA) で観測された磁場の微細構造 [6]: (a), (b) の白線, 可視偏光観測の示す磁場構造 [7]: (d) の太い黒線分である. 背景のグレースケールは, (c) JCMTで観測した $850 \mu\text{m}$ 連続光 [2], 及び (d) 水素の柱密度 [8] である. (a), (b) の等高線はCARMA 1.3 mm 連続波の強度 [6] を示す. 各図下端にそれぞれの図の縮尺を示す. 単位はpc (パーセク) またはau (天文単位). (c) 図の青破線に沿ったフィラメントの断面プロファイル を7章及び図6に示す.

雲の磁場もこれに倣い、分子雲にほぼ垂直な、図中右上から左下に伸びる一様な分布を示す。

プランク衛星の空間分解能は、ペルセウス座分子雲の距離では約1パーセクに相当する。すなわち、図1 (d) に示されるのは磁場の1パーセク〜20パーセクスケールの空間構造である。1パーセク以下の細かい磁場構造は、この観測では捉えられない。一方、星からの偏光を観測する可視偏光観測は非常に空間分解能が高い（“星の大きさ”に相当するスケールの磁場構造が示される）が、限られた点数の情報しか得られないこと、さらには分子雲中の柱密度の濃い領域を見通せず、より薄い領域の磁場分布しか観測できないという制約がある。

一方JCMTで観測すれば、柱密度の濃い星形成領域内部の磁場構造を、0.02パーセクの非常に細かいスケールまで捉えることができる。我々はBISTROプロジェクトの一環として、ペルセウス座分子雲中の星形成領域NGC 1333をJCMTで観測し、活発な星形成領域中の磁場構造を詳細に明らかにした（図1 (c). 対応する観測領域を図1 (d) に白枠で示す）。

3. BISTROの観測：1パーセク以下のランダムな磁場構造

図1 (c) に、BISTROプロジェクトを通じて得られた、NGC 1333領域（図1 (d) 中の白枠の領域）の観測結果を示す。グレースケールで示すのは波長850 μm の連続波全強度であり、これは領域中の物質の分布を表す。図に見られる通り、観測領域の全体にわたり、星間物質の細長く伸びた網目状の分布が観測される。

この、幅約0.1パーセクの細長く伸びた星間物質分布は「フィラメント」と呼ばれ、星が形成される重要な現場と考えられている [10, 11]。またその細長く伸びた構造から、フィラメント構造の形成には磁場が重要な役割を果たしていると考えられている。これは星間ガスが自己重力により収縮する際に、ガスの動きやすい磁場に沿った方向に、

選択的に収縮すると考えられるためである [12]。

図1 (c) の通り、NGC 1333領域にはフィラメント構造が多く含まれ、活発な星形成へと至るフィラメント構造と磁場との関係について探る観測対象として理想的である。図1 (c) に黒線で示すのが、我々の観測した磁場分布である。図に見られる通り、我々はフィラメント構造に付随する磁場分布を領域全体にわたって明らかにした。一つの星形成領域全体について、フィラメントと磁場との関係がここまで詳細に観測されたのは初めてである。

観測領域の周囲に描かれた白の太線は、プランク衛星の観測した、分子雲規模の大スケールの磁場構造（図1 (d) と同じもの）を示す。プランク磁場が方位角のよく揃った一様な分布を示すのに対し、我々の観測は、分子雲内部の星形成領域内では、磁場が非常に複雑な構造をしていることを示す。これは空間分解能1パーセクのプランク衛星の観測では伺い知れない、JCMTを用いたBISTROの観測で初めて明らかとなった磁場構造である。

4. 磁場とフィラメントの関係：各フィラメントと磁場は異なる角度で整列する

互いに空間スケールの異なるBISTROとプランク衛星の観測した磁場のつながり、すなわち空間スケールに応じた磁場構造の変化を調べるために、BISTROの観測データから得られる各空間スケールでの磁場方位角分布を、プランク衛星の観測データと比較してみる（図2）。図に示す通り、磁場の向きは1パーセクスケールでは一様に近く、その方位角はプランク衛星の観測データと一致する。一方空間スケールが0.3パーセクを下回ると、磁場の方位角分布の分散は急激に増大してランダムに近い値となり、それ以下の空間スケールでは分散は変化せずほぼ一定である。図1 (c) に見られる通り、この0.3パーセクという空間スケールが、この領域のフィラメントの典型的

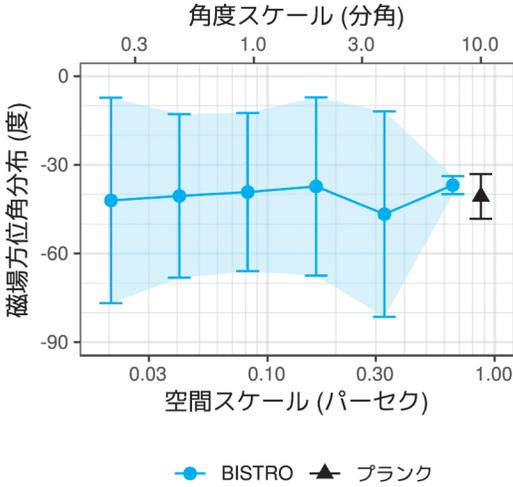


図2 各空間スケールに対応する磁場の方位角の分布。誤差棒が各空間スケールの方位角分散を示す。BISTROの観測した各フィラメントに付随した磁場の角度分散を、プランクの観測結果と比較している。見積もり方法の詳細は文献[2]を参照。

な長さであることに注意されたい。

実際、一見ランダムに見えるBISTROの磁場分布ではあるが、図1(c)を詳細に見ると、一つのフィラメントに対し様な角度で整列していることがわかる。ただし各フィラメントに対する磁場の相対角は、フィラメント毎に異なる。例えば図中A, Cのフィラメントに対しては磁場はほぼ垂直に整列するが、Bのフィラメントに対しては平行に近い角度で整列している。すなわち、個々の領域の磁場は、それぞれの向きの異なるフィラメントに対し、異なる相対角度で整列して観測される。

これらのフィラメントの単位長さ当たりの質量を見積もると、1パーセク当たり50-250太陽質量の非常に重いフィラメントであることがわかる。このような大質量フィラメントは、自己重力をガス圧のみで支えることができず、そのため磁場が内部に引きずり込まれる結果、フィラメントに対する垂直な磁場分布が予想される。

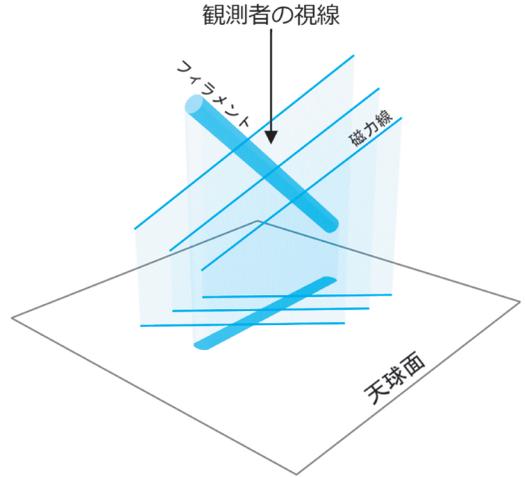


図3 3次元空間内でフィラメントを垂直に貫く磁場の模式図。我々が観測するのは、天球面上に投影された2次元分布である。

5. フィラメントと磁場の3次元形状

これに対し、我々の観測結果は、磁場はフィラメントに対し整列するが、その相対角度は垂直～並行とかなりバラエティに富むことを示している。この結果を我々は図3の通り解釈した。

我々の観測しているフィラメントの方位角及び磁場の方位角は、いずれも天球面に投影された二次元平面内の分布であり、視線奥行き方向の分布は見えていないことに注意されたい。その結果、磁場とフィラメントが互いに垂直に整列している場合でも、これを三次元空間内で斜め方向から観測した場合、観測される磁場とフィラメントの相対角度は垂直よりもずっと小さな角度になりうる。これは我々の観測した「フィラメントに対しある一定の(ただし垂直とは限らない)角度で整列する」という磁場の特性をよく再現する。

その一方で、この様に垂直に整列したフィラメントと磁場を様々な方向から観測すると、確率的にはやはり本来の角度である垂直な関係が多く観測されると期待される(図4)。これは、2章で紹介した、分子雲を垂直に貫く磁場分布がよく観測されるとするプランク衛星の観測結果[9]と合致

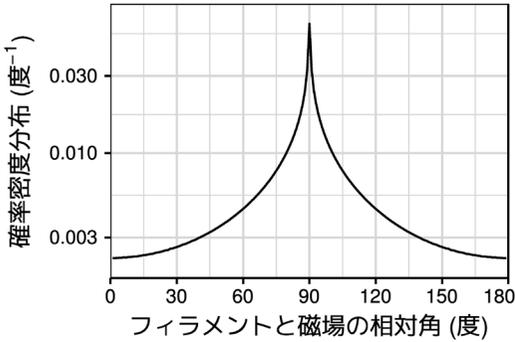


図4 フィラメントと磁場の相対角度の期待値分布。互いに垂直に交わるフィラメントと磁場を、三次元空間中のランダムな方向から観測した場合の期待値の分布を示す。フィラメントと磁場が垂直に交わる相対角90°の観測確率が最も高い。

する。また図1(c)の我々の観測結果もまた、フィラメントに平行な磁場分布よりも、垂直な磁場分布が多く観測されることにも注意されたい。

6. フィラメントが磁場に及ぼす影響の仮説

BISTROの観測した小スケール磁場がプランク衛星の観測と大きく異なる複雑な構造を示すのに対し、図1(d)の可視偏光観測は、空間分解能がBISTROよりもさらに高い(≪1天文単位)にもかかわらず、プランク衛星の観測とよく一致する磁場分布を示す。可視偏光観測を行った各星までの距離を調べた結果を図5に示すが、観測される磁場方位角と偏光の程度(偏光度)が共に、ペルセウス座分子雲の距離約300パーセクを境に大きく変化する一方、その前後では(おうし座分子雲の距離約150パーセクを除き)距離に依存しないほぼ一定の値を取ることがわかる。つまり偏光はほぼペルセウス座やおうし座の分子雲のみで生じており、分子雲の前景や背景のさらに薄い星間ガスはほぼ寄与していない(見えていない) [3]*1。

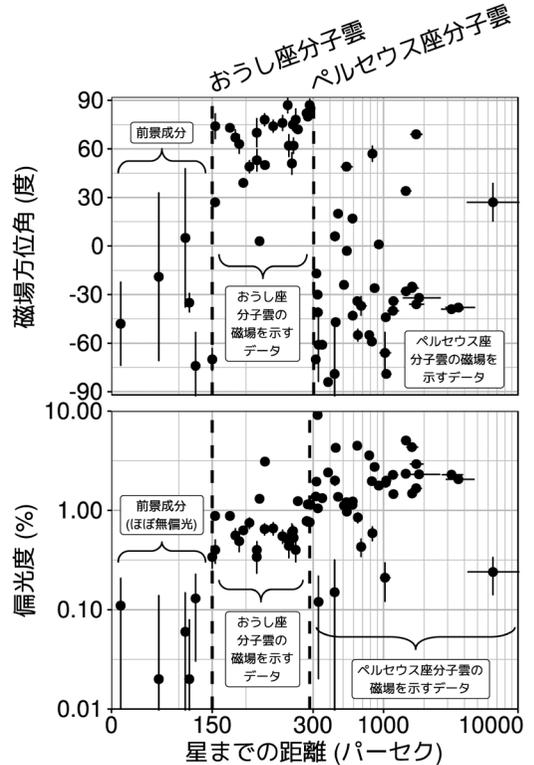


図5 ペルセウス座方向の可視偏光観測データ [7]の、各星までの距離に応じた変化。図中の縦2本の破線は、統計的に求めたデータの変化点である。磁場方位角、偏光度共におうし座分子雲(距離約150パーセク)とペルセウス座分子雲(距離約300パーセク)に相当する2カ所で値が明確に変化しており、したがってこれらの分子雲に付随する磁場を観測していることがわかる。一方それ以外の距離では値の明確な変化は見られない。つまり分子雲と分子雲の間に存在する薄い星間ガスは、可視偏光観測の結果にほぼ寄与していない(見えていない) [3]*1。300パーセク以遠のデータは正確にはペルセウス座とおうし座2つの分子雲の寄与の重ね合わせであるが、この方向のおうし座分子雲が薄く、生じる偏光が小さいため、ほぼペルセウス座分子雲の寄与と言ってよい。図1(d)にプロットした可視偏光データは、この300パーセク以遠のものである。

*1 このように星の偏光観測結果と各星までの距離を組み合わせることで、星間磁場の分布を3次的に解き明かすことができる。詳しくはDoi et al. [3]を参照されたい。

したがって可視偏光観測は、奥行き方向には BISTRO のサブミリ波観測と同様の、分子雲中の小スケール磁場を見ていると言える。にもかかわらず BISTRO の観測結果とは異なり、可視偏光観測はプランク衛星の観測とよく一致する磁場分布を示すのである。すなわち、磁場は可視偏光観測の可能な薄いガス領域（柱密度 $N_H \lesssim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、フィラメント構造は未発達）では小スケールの磁場も大スケールの磁場と一致する一方、BISTRO の行ったサブミリ波偏光観測で測定される濃いガス領域（ $N_H \gtrsim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ 、フィラメント構造が発達）では、0.3 パーセク以下の小スケール磁場は、大スケールの磁場とは大きく異なる複雑な（そして各フィラメントに対して整列した）磁場分布を示すことがわかる。

以上から、我々は以下の仮説に至った。

【仮説】

大局磁場は、濃い分子雲中のフィラメントの影響、恐らくはその形成時の重力収縮により局所的に歪められ、各フィラメントに対して垂直に整列している。

7. フィラメント内部の“くびれた”磁場

BISTRO の観測結果から、フィラメント内部の磁場構造をさらに丁寧に調べることで、フィラメント形成時の磁場変形のもう一つの証拠を見出すことができる。

観測したフィラメントからの放射の断面プロファイル（偏光した放射と偏光していない放射）について比較してみる。一例として、図1(c)中の青破線に沿った断面プロファイルを図6に示す。偏光した放射の強度で測定したフィラメント（青点線）の太さが、偏光していない全強度で観測した場合（黒実線）に比べ、細いことがわかる。

磁場の影響により生じる偏光の強度分布は、もし磁場の影響がフィラメント内外で同じであれ

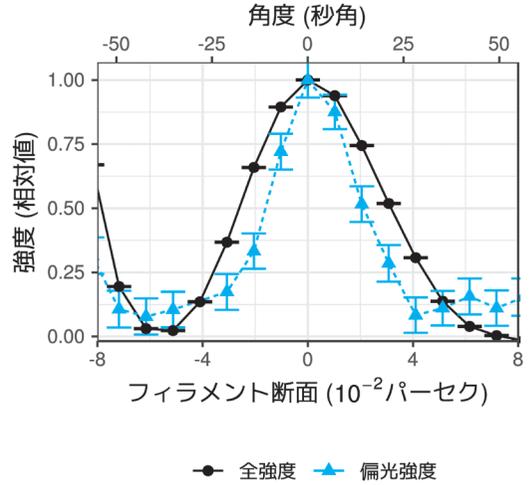


図6 フィラメント断面プロファイル例。BISTRO の観測したサブミリ波の全強度および偏光強度の断面プロファイルを示す（プロファイルの位置を、図1(c)中に青破線で示す）。偏光強度のプロファイルは全強度のプロファイルよりも細く、その太さの比はおおよそ0.7である。

ば、全強度のフィラメントと同じ太さになるはずである。実際、我々の観測でも多くのフィラメントについて、全強度と偏光強度はほぼ同じ太さとなる。あるいはフィラメント内部の濃い分子雲中では、外部光の遮蔽によるダスト回転トルクの不足やガスの乱流の影響から、磁場によるダストの整列が乱され、偏光効率が下がると考えられる。その場合は偏光強度はフィラメント中心部で頭打ちとなり、フィラメントの太さとしてはむしろ広く観測されることになる。

しかしながら、我々が一部のフィラメントについて見出した全強度に比して“幅の狭い”偏光強度分布は、これらの予測と相容れない。このためこれまでにない説明が求められる。可能な説明は、視線方向に重なった異なる方向の磁場を観測することで、それぞれの磁場成分に起因する偏光が互いに打ち消し合って偏光強度を弱める“geometrical depolarization（幾何学的脱偏光）”である。特に、もし各々のフィラメントの内部で磁場が規則的に曲げられていれば、観測される偏光強

度分布が全強度よりも鋭い（細い）分布を取りうるかも知れない。

我々が有力な説明と考えるのは、フィラメント内部に引きずり込まれた磁場が“くびれた”構造を示しているというものである。図7 (a), (b) に示す、フィラメントの断面図を見て頂きたい。Tomisaka [12] は、フィラメントを垂直に貫く磁場が、フィラメント形成時の軸対称な収縮に応じてフィラメント中心部へ向けて引きずり込まれ、くびれた構造を示す平衡解を求めた。図7 (a), (b) が示すのは、このフィラメントを輪切りにした際の密度分布の断面図（実線）、及びそれを垂直に貫く磁場分布（点線）である。

このフィラメントを観測する時、磁力線の曲がりに応じて、視線方向に重なった異なる方向の磁場を観測することになる。その曲がり方は、フィラメント中心軸付近では視線に沿って比較的小さいのに対し、軸から離れた視線はより大きく曲がった磁場を見通して観測することになる。このため様々な方向からこのフィラメントを観測した際の全強度と偏光強度の断面プロファイルを見積もってみると、見通す方向によっては偏光強度の太さが全強度に比べてかなり狭く（幅比<0.8）なることがわかる。この傾向はフィラメントが“重く”、磁力線をより強く内側に引きずり込んだフィラメント程顕著である。一方フィラメントが“軽く”、磁力線をほとんど曲げない場合、様々な角度から観測した場合でも、全強度と偏光強度のフィラメントの太さはほとんど変わらない（図7 (c))。

我々の観測結果は、この幅比、すなわち偏光強度太さ／全強度太さの比が、場所によって0.8を下回るかなり小さい値を取ることを示している。この小さな幅比を説明するためには、フィラメントがかなり“重く”、曲げられた磁力線のもたらす反発力（磁気張力）によりぎりぎり支えられた「磁気臨界状態」に近い状況であることが理論計算により示される。これは観測領域中のフィラメント質量が長さ1パーセク当たり約100太陽質量

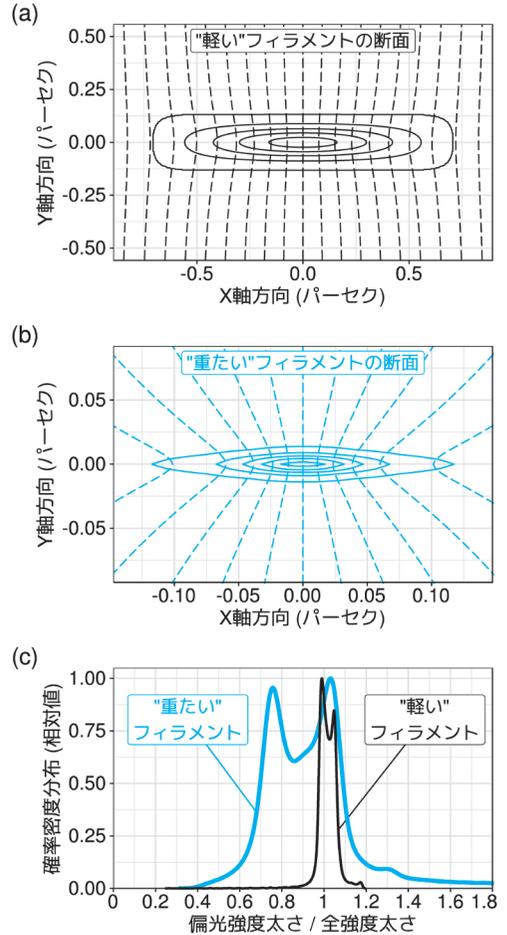


図7 (a), (b): 磁場に貫かれたフィラメントの断面形状 [12]. フィラメント中の物質分布を等高線（実線）で、フィラメントを垂直方向に貫く磁力線を点線で、それぞれ示す。フィラメントが“軽い”場合 (a) に比べ、“重たい”場合 (b) は、フィラメント中の物質の自己重力により、磁場がより強く内側に引き込まれる。ここで (b) のフィラメントは「磁気臨界状態」にある。(a) のフィラメントの質量は、(b) のフィラメント質量の6割程度である。(c): (a), (b) の二種類のフィラメントをランダムに様々な方向から観測した場合の偏光強度と全強度のフィラメント太さ比の確率分布。磁力線がほとんど曲げられない“軽い”フィラメント (a) の場合、観測される偏光強度と全強度の太さはほぼ同じであり、太さの比は常にほぼ1である。一方磁力線が強く曲げられる“重たい”フィラメント (b) の場合、比が1を大きく下回る (<0.8) 場合が十分な確率で存在する。

と、非常に重たいことと矛盾しない。かつ、我々の観測したフィラメントが磁気臨界状態にあると仮定して求められる磁場強度は約60マイクロガウスであり、フィラメントの濃い分子ガス中の磁場強度として矛盾のない値である。

つまり我々の得た観測結果は、磁場に垂直に貫かれたフィラメントが、その形成時に磁場を中心部へ向けて引きずり込んでいるという描像と非常によく合致するのである。

8. 星形成コア中の小スケールの磁場との連続性

フィラメント形成後、その内部ではさらに分子雲の分裂が進み、より濃い領域が星形成コアとなって、その内部で星が誕生すると考えられる。星形成コア内部の磁場構造は、JCMTよりもさらに空間分解能の高い、電波干渉計を用いた観測により確かめることができる。

例として、図1 (a), 1 (b) に観測領域中の有名な星形成コアであるSVS 13とIRAS 4Aの観測結果を示す[6]。BISTRO (JCMT) の観測結果は、電波干渉計 (CARMA) が空間分解能1/200パーセク (=1000天文単位) の高空間分解能で見た磁場構造と、非常によく合っていることがわかる。我々は領域内のすべての観測結果について、BISTROと電波干渉計の観測結果がこのような滑らかにつながることを確認した。つまり、フィラメント形成により0.3パーセク程度のスケールで曲げられた磁場は、それ以下のスケールでは1000天文単位程度まで新たな擾乱を受けることなく、一貫した磁場構造を維持するのである。

一方、図8に示すように、領域中に多数観測される原始星からのCO分子双極流の向き[13]は、我々の観測した磁場の向きと一致しない。分子双極流の向きが原始星と星周円盤の回転軸の向きを示すとすれば、コア内部の原始星の自転軸は星形成コア周囲の磁場の向きとは異なり、ランダムな方向に分布していることになる。すなわち、フィ

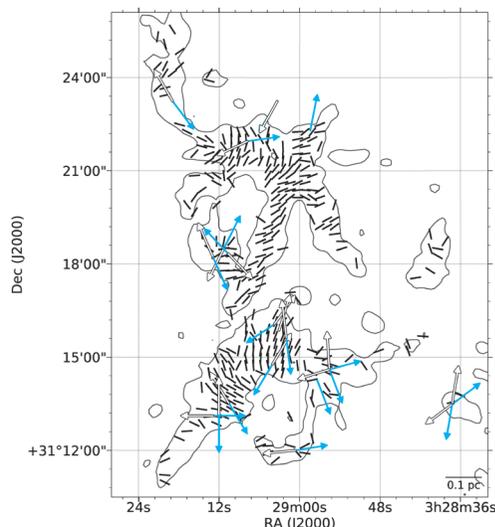


図8 BISTROの観測したNGC 1333領域の磁場分布(黒線分)と、領域中の原始星からのCO分子双極流[13](白矢印:我々から遠ざかる噴流・青矢印:我々に向かう噴流)の比較。分子双極流の向きは磁場の向きと一致しておらず、互いにランダムに分布する。

ラメント形成により大きく曲げられた磁場は、その後星形成コア内部に至るまで一貫した磁場構造を維持するが、コア中心部で原始星が形成される段階ではその物質回転軸を制御するには至らず、恐らくはこのスケールで磁場構造は再度大きな改変を受けていることが考えられる。

9. まとめと今後

連続的な空間スケールの磁場観測から、大局磁場が濃い分子雲中でフィラメント形成による局所的な改変を受けている様子、すなわち磁場構造の進化過程が見えてきた。我々の観測した重たいフィラメントは、自己重力による収縮が磁場の力により支えられた磁気臨界状態に近いことが示唆される。このことは、星形成領域内のフィラメント形成、及びフィラメント内のコア形成による星形成過程に対し、磁場が重要な影響を及ぼしていることを強く示唆する。今後より多くの星形成領域について今回観測された磁場の進化過程を調べ

ることで、我々の考えるフィラメントと磁場との相互関係の【仮説】の確度を高め、星形成過程に対する磁場の寄与を具体的に明らかにできると期待する。

謝 辞

本稿の元となったJCMTの観測及びデータ解析、特に一次データ処理のパイプライン開発は、BISTROプロジェクトメンバーの多大な貢献により行われました。星形成領域NGC 1333の解析に当たっては、プロジェクト内の主担当である日本チーム・カナダチームの皆さんと密に議論し、多くのサポートをいただきながら進めさせていただきました。ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Ward-Thompson, D., et al. 2017, ApJ, 842, 66
- [2] Doi, Y., et al., 2020, ApJ, 899, 28
- [3] Doi, Y., et al., 2021, ApJ, 914, 122
- [4] Doi, Y., et al., 2021, ApJ, 923, L9
- [5] Planck Collaboration, et al., 2020, A&A, 641, A12
- [6] Hull, C. L. H., et al., 2014, ApJS, 213, 13
- [7] Goodman, A. A., et al., 1990, ApJ, 359, 363
- [8] Zari, E., et al., 2016, A&A, 587, A106
- [9] Planck Collaboration, et al., 2016, A&A, 586, A138
- [10] André, P., et al., 2010, A&A, 518, L102
- [11] Arzoumanian, D., 古屋玲, 2022, 天文月報, 115, 631
- [12] Tomisaka, K., 2014, ApJ, 785, 24

- [13] Stephens, I. W., et al., 2017, ApJ, 846, 16

Multiscale Magnetic Field Structure in and Around the Perseus Molecular Cloud

Yasuo Doi

*Department of Earth Science and Astronomy,
Graduate School of Arts and Sciences, The
University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro,
Tokyo 153-8902, Japan*

Abstract: We present the magnetic field structure inside and outside the Perseus Molecular Cloud revealed by the BISTRO survey. We observed that the magnetic field of a star-formation region inside the dense molecular cloud changes its structure drastically on a spatial scale below 1 parsec. The magnetic field is bent or dragged inward by ISM filaments, which are thought to play an essential role in the star formation activity, most probably by the gravitational contraction at filaments' formation. On the other hand, MHD simulation suggests that filaments are magnetically critical, meaning that the magnetic pressure supports the filament and prevents its gravitational contraction. Our observations may uncover a part of the interplay between the interstellar medium and the magnetic field during star formation.