

第二安定領域：数値計算における新現象の発見

ロバート・ゲラー（地球惑星科学専攻 教授）
 水谷 宏光（地球惑星科学専攻 特任研究員），平林 伸康^注（シュルンベルジェ株式会社）

◆ ◆ ◆
 われわれは、数値計算において今まで知られていなかった現象を発見し、その現象の起きる条件範囲を「第二安定領域」と命名した。この発見は、地震波伝播計算の新しい高精度手法を開発する途上で得られた。この新しく開発した高精度計算手法は今後の地球内部構造や資源開発の研究に大きな進歩をもたらすことが期待される。
 ◆ ◆ ◆

これまで、われわれのグループは地震波伝播の数値シミュレーションのための高精度計算手法を開発してきた。地震波伝播の基礎方程式は、連続弾性体の運動方程式であり、これを時間および空間について離散化することで数値計算が可能になる。さて有限差分法は一定の時間間隔（タイム・ステップ、 Δt と書く）ごとに地震波による変位場を計算する手法であり、現在の時刻（ t ）と1ステップ前（過去： $t-\Delta t$ ）の変位場を用いて、1ステップ先（未来： $t+\Delta t$ ）の変位場を計算する。一般的な有限差分法では、時間間隔 Δt を大きくし、ある上限（ Δt_1 ）を超えると計算誤差が急激に大きくなる。この状態を不安定とよび、0から Δt_1 までの範囲を時間間隔についての安定領域とよぶ。

今回われわれが開発した高精度計算手法では、予測子修正子法（Predictor-Corrector法）とよばれる手法を用い、1ステップ先の地震波を計算するときに、まず予測場を計算し、次にその修正場を計算する、という2段階の計算を行う。この手法を用いた場合、安定領域を越えて時間間隔を大きくすると、ある特定の値（ Δt_2 ）を超えたところで、計算は急に不安定から安定に戻ることがわかった。またさらに時間間隔を大きくし、ある特定の値（ Δt_3 とよぶ）を超えると、再び計算が不安定になる。この Δt_2 から Δt_3 までの領域を、われわれは「第二安定領域」と命名した。なお、定数 Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 は媒体の地震波

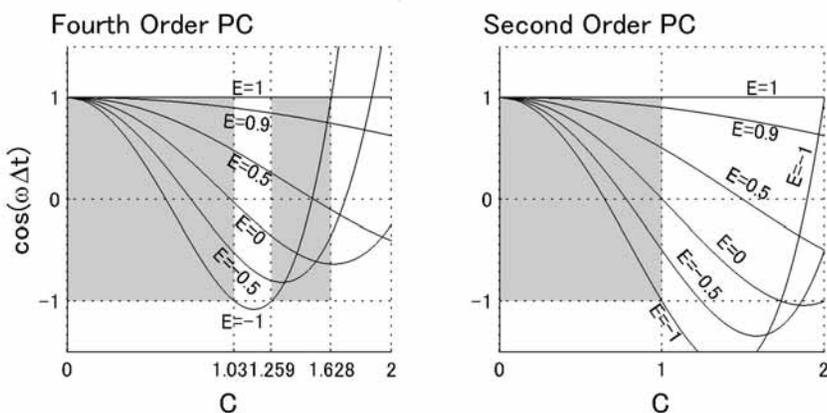
速度と空間内の格子間隔に依存する。

図に2種類の高精度計算手法について安定領域の範囲を示す。計算する空間にはさまざまな空間波数をもつ波が存在する。その違いを E というパラメータで表す。図の縦軸に振動数 ω と時間間隔 Δt の積の \cos を示す。これは横軸の C （地震波速度と空間格子間隔で規格化した時間間隔）によって決まり、 -1 から $+1$ の範囲ならば、その波数について計算が安定であることを意味する。灰色で示した部分では、すべての E （すなわちすべての波数）に対して計算が安定である。 C が約1より小さい範囲が従来知られていた安定領域である。それに加えて左の例では C が1.259から1.628の範囲に第二の安定領域が存在し、右の例では C が2となる一点が第二安定領域となる。

つまり、この手法を用いれば、これまでの通念上の「常識」よりも大きな時間間隔を用いて安定に計算できる。またこのことは、従来の方法よりも高速に計算できることを意味する。（なお、この研究成果は有限差分法の基礎となる「CFL」理論と食い違うものではない。）地震波伝播計算の分野において、これまでさまざまな高精度な離散化手法が開発されてきているが、このような第二の安定領域をもつ手法が確認されたのはこの手法が初めてである。今回の研究成果は、単純な均質媒体におけるものであるが、第二安定領域の存在は、数値計算における新

しく、かつ、想定外の発見である。また、この研究成果は、弾性定数や密度が均質でない媒体における地震波伝播の計算手法の安定性の検証に役立つと期待される。本研究は Robert J. Geller, Hiromitsu Mizutani, and Nobuyasu Hirabayashi, *Geophysical Journal International* 188, 253 (2012) に掲載された。

（2011年11月21日プレスリリース）



二つの計算手法について安定領域を計算した結果。安定領域を灰色で示す。4次精度手法では二つの有限な幅をもつ安定領域があるが（左）、2次精度手法では二つ目の安定領域は $C=2$ の一点になる（右）。

注) 2006年度地球惑星科学専攻博士課程修了

銀河同士の衝突からひも解く銀河の進化

植田 準子 (天文学専攻 博士課程 1年)
川邊 良平 (国立天文台 教授, 天文学専攻 兼任)

銀河が進化する上で鍵となる銀河同士の衝突過程を理解するために、もっとも近傍にある衝突銀河に分布する分子ガスを観測した。これまでの研究よりも約 10 倍高い解像度で分子雲の空間分布を明らかにした結果、可視光の観測では星が見えないが、星の材料となる分子雲が豊富にある領域が特定できた。この領域では、近い将来、活発な星形成が起り、星の大集団が誕生する可能性が高い。さらに、銀河中心に流れ込む大量の分子ガスをとらえた。これは衝突後の銀河の運命を大きく左右する巨大ブラックホールの成長にも関係すると考えられる。

膨張する宇宙の中でも銀河と銀河は衝突することがある。銀河同士の衝突は、銀河の形態を変化させるとともに、爆発的な星の誕生を引き起こすため、銀河の進化において重要な役割を果たすと考えられている。よって、衝突している銀河での星形成活動や、衝突・合体のプロセスを調べることは、銀河の進化を理解する鍵となる。

星と星の間に漂っている分子ガスが密集すると、密度の高い分子雲になる。分子雲が重力で押し縮められると、星が誕生する。分子ガスの主成分は水素分子であるが、水素分子は電気双極子モーメントを持たないため、どの波長を使っても観測するのが困難である。そこで、水素分子の分布や存在量とよい相関を示す一酸化炭素分子を観測することにより、水素分子の存在を決定する。一酸化炭素分子は、星形成の重要な指標になる。

われわれは、国立天文台の伊野野大介助教らと共に国際共同研究チームを結成し、米国サブミリ波干渉計を用いて、「触角

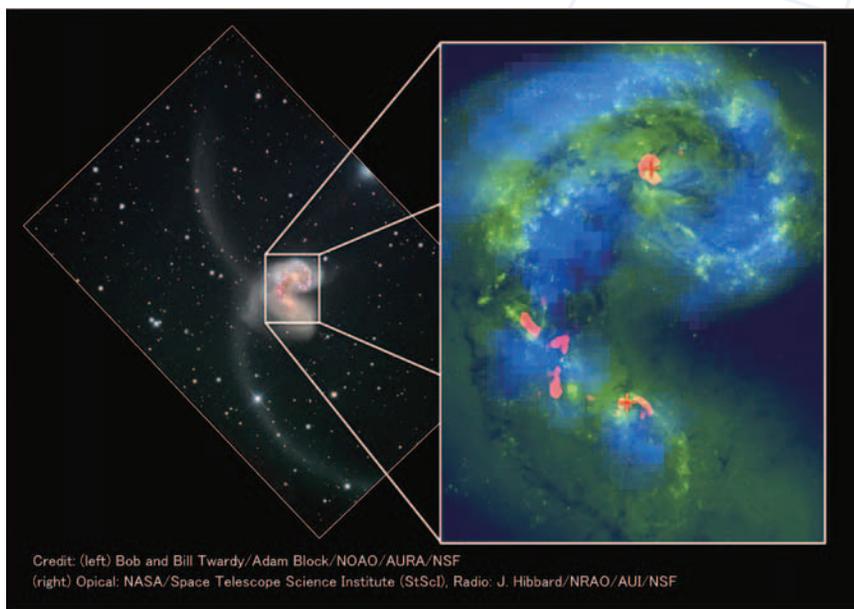
銀河」の分子ガス観測に取り組んだ。触角銀河は、二つの渦巻銀河が衝突してひとつに合体しようとしている衝突銀河である。図のように、その形状が昆虫の触角に似ていることから触角銀河とよばれる。われわれは、複数台の電波望遠鏡を結合して観測する干渉計を使用することで、これまでの研究よりも約 10 倍高い解像度で触角銀河に分布する分子雲の空間分布を明らかにすることに成功した。

衝突の影響が大きいと考えられる二つの渦巻銀河間の領域で、可視光で観測された星団と分子雲の位置関係を調べたところ、それらの位置の相関が低いことを新たに発見した。今回の観測でとらえた分子雲には、それぞれ太陽の 100 万倍もの質量の分子ガスが含まれていて、星団を誕生させるのに十分なガスが密集している。また、分子ガスの形成に必要な星間ダストとよい位置相関を示していることから、今後さらにたくさんの分子ガスが形成されて、これらの分子雲の中から星の大集団が生まれる可能性が高い。

さらに、触角銀河の片方の渦巻銀河では、銀河中心に流れ込むガスの成分や、銀河中心の周りを回転していると予想されるガスの成分をとらえた。これらのガスの運動は、衝突銀河の理論シミュレーションからも予想されていた。とくに銀河中心へのガスの流れ込みは、巨大ブラックホールの成長にも関係するため、重要なガスの運動として注目される。

触角銀河は今年度から初期運用が開始されたアルマ望遠鏡でも観測されており、われわれのグループではそのデータの解析に着手している。本研究は、J. Ueda *et al.*, *The Astrophysical Journal* 745, 65 (2012) に掲載された。

(2011 年 11 月 22 日プレスリリース)



Credit: (left) Bob and Bill Twardy/Adam Block/NOAO/AURA/NSF
(right) Optical: NASA/Space Telescope Science Institute (STScI), Radio: J. Hibbard/NRAO/AUI/NSF

(左図) 可視光で見た触角銀河。(右図) 中性水素原子ガス (青)・一酸化炭素分子ガス (赤)・可視光 (緑) でみた触角銀河。中性水素原子ガスは、星形成とは関係の薄い希薄な星間ガス。赤色のプラスは、二つの渦巻き銀河の銀河中心。「国立天文台、東京大学 提供」

ヒッグス粒子発見の可能性高まる

浅井 祥仁 (物理学専攻 准教授)

相対論を習った時、光だけがなぜこんなに特別なのか？と思った人も多いと思う。じつは光とほかの多数の素粒子の振る舞いが決定的に異なる原因は、質量の有無である。質量がない光は“静止”できず、いつも一定速度で運動しているが、他の素粒子は、その質量ゆえに、つねに光速より遅く走っており、静止することもできる。しかしその「質量」はどのような機構で素粒子に与えられているのかという根本的な問題は、まだ未解明で、「ヒッグス粒子」の発見はその答えになると期待されている。われわれはこのヒッグス粒子の尻尾を捕まえたかもしれない。

ヒッグス場は真空にあまねく潜んでいて、その中を運動する素粒子と反応することにより、素粒子に質量を与えていると思われる（「理学のキーワード」2007年3月号）。この「あまねく」真空にいる奴を取り出すことがなかなか難しく、過去40年以上、われわれの追求をかわしてきた。そこで世界中の研究者が協力し、ジュネーブ郊外の地下100mに円周27kmの巨大な加速器LHC (Large Hadron Collider) を建設した。この装置で陽子を高いエネルギーまで加速して正面衝突（重心系エネルギー7 TeV）させ、高いエネルギー状態を一時的に作り出し、ヒッグス粒子を真空から取り出そうという試みである。

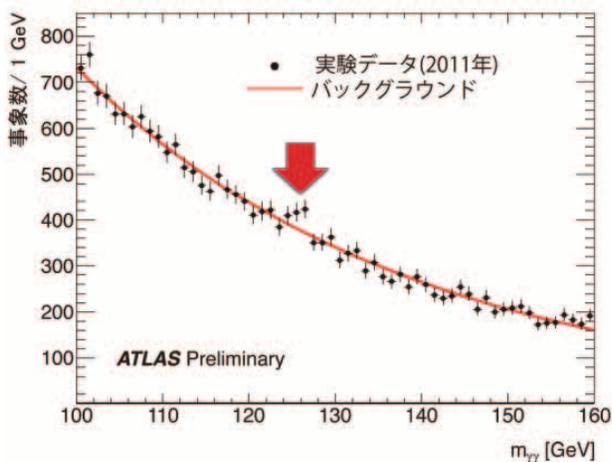
LHCは2010年より本格稼働を始め、2011年に約500兆回、陽子と陽子を衝突させた。しかしこうした衝突では、ヒッグス以外の既知の素粒子現象に起因した反応（バックグラウンド）がひじょうにたくさん起こり、その中からヒッグス粒子が生成された痕跡を探し出す必要がある。ヒッグス粒子は素粒子とよく反応するため、生成されたとしても、すぐに二つの粒子対に崩壊する。このうち W^+W^- 、 Z^0Z^0 、 $\gamma\gamma$ 、 $\tau^+\tau^-$ ^{注1)} という4種の粒子の対生成が、きれいに観測できると期待されている。 γ 線は質量が無いのでヒッグス粒子と直接は結合しないが、トップクォークという重い素粒子を仮想的に交換することで、ヒッグ

スから $\gamma\gamma$ への崩壊が可能になる。

約500兆回の中からこれらの痕跡をさがすのは、干し草の山の中から小さな針を探し出すような困難を伴う。さまざまなアイデアを出しながらこれを克服しても、どうしても除ききれないバックグラウンドがあり、最後はこのバックグラウンドの統計的なふらつきと較べて、信号と思われるものが有意に多いか否かの統計的な判断が必要になる。図は、ヒッグスが $\gamma\gamma$ に崩壊した場合を探索した結果であり、二つの γ の計測から計算した崩壊前粒子の不変質量^{注2)}の分布を示す。バックグラウンドが作る連続的な分布の上に126 GeV付近にちよこっと小山のようなものが見えている。統計的なふらつきで説明しようとする、 2.8σ 程度である。この程度の統計ゆらぎはザラであるが、二つの異なる検出器（ATLAS検出器、CMS検出器）で同じような領域に超過が観測され、さらにZZやWWなどの崩壊データにも、同じような質量領域に超過が観測された。複数の検出器の複数の解析モード（統計的に独立）で、同じような箇所に超過が観測された点が重要であり、「ひじょうに興味深い」ヒントである。しかし統計的には、まだ確実なレベルではなく、ATLAS検出器では 3.6σ (2.5σ)、CMS検出器では 2.6σ (1.9σ)程度である。二つの数字があるのは、前者は125 GeV付近の狭い領域で考えたゆらぎの頻度で、後者（かっこの中）は、探索領域全体の広い領域で、観測された大きさのゆらぎが起きる頻度（Looking Elsewhere Effect）である。どこで起こっても良いゆらぎが、たまたま125 GeV付近だったと考えた安全な評価である。

結果は今年の実験まで持ち越しである。ヒッグスがない場合も含めて、2012年の実験でより明確な結果が得られるであろう。

(2011年12月14日プレスリリース)



陽子衝突で発生した二つの γ 線の不変質量分布。黒丸が実験データ、赤線がフィットで求めたバックグラウンド分布。

注1) W^+ 、 W^- 、 Z^0 は弱い相互作用を媒介する重い「弱ボゾン」、 γ は光子、 τ^+ と τ^- は、電子陽電子を第1世代、ミュー粒子を第2世代とする荷電軽粒子の第3世代粒子である。

注2) 発生した全粒子のエネルギーと運動量を測定すると、エネルギー・運動量の保存法則により、崩壊前の粒子がその重心系でもっていた全エネルギーを計算できる。これを光速の二乗で割ったものが不変質量で、これは崩壊前の粒子の質量と見なすことができる。