

サイエンスピックアップ

国際リニアコライダーの実現に向けて

物理学専攻 准教授 佐貫 智行



「国際リニアコライダー」とは、“宇宙誕生の謎”や“極微の素粒子の世界”に迫る次世代の研究施設です（図1）。膨大なエネルギーを空間の一点に叩き込むことによって“小さな宇宙”を創り出し、素粒子の性質や時

空の構造など、最先端の物理学を研究することを目指しています。技術的な設計を完了し、東北地方の北上山地での建設実現へ向けた工学設計を進めています。

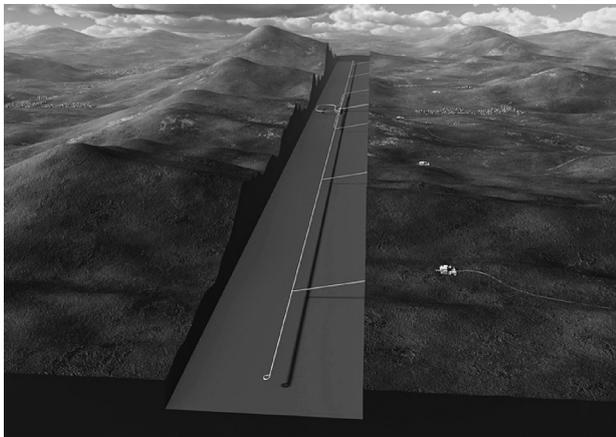


図1. 国際リニアコライダー (ILC) の鳥瞰図。地下に設置される最先端の研究施設で全長は31 kmに達する。将来的には50 kmまで延伸する計画もある。(イラスト Rey. Hori)

リニアコライダーのアイデアは1965年に提案されました。これは、非常に小さな粒子を効率よく加速し、加速した粒子同士を衝突させることができる装置です。アイデアが提案された後、国際競争と国際協力によって実現へ向けた技術開発が進められました。素粒子物理学の観点から興味深いエネルギーでの衝突を実現するためには、リニアコライダーの全長は30 kmから50 kmもの長さになります。その規模の大きさから、世界に1台のリニアコライダーを建設することとして、計画立案の当初から国際的に設計や技術開発を進めてきました。そのために、国際リニアコライダー (International Linear Collider; ILC) の名称があります。2013年6月にILCの設計や開発の成果を5巻組の技術設計書として公開しました。また、同年8月には、日本国内の研究者から、国内のILC建設地としては北上サイトが最適であるとの評価結果が発表されました。北上サイトとは、岩手県と宮城県に広がる北上山地内にある花崗岩体を中心とした地域のことです。

ILCで加速する粒子は、もっとも身近な素粒子である電子と、電子とは全く反対の性質を持つ陽電子です。ILCの一方の端から電子を、他方の端から陽電子を、中心へ向かって一気に加速します（図2）。電子も陽電子も光の速さの99.999999998%にまで加速されると同時にその軌道が正確に制御され、ILCの中心で正面衝突します。ほぼ光速で正面衝突する際のエネルギーは膨大で、温度で表現すれば5,000兆度ほどに達します。このように非常に高いエネルギーを持った電子と陽電子が正面衝突した後、小さな“ビッグバン”が起こり、様々な粒子が飛びだしてきます。この粒子を巨大な測定器で記録、解析して、星々や私たちが重さを持っている理由や、宇宙の多くを占めるが素性の分からない暗黒物質の正体、この時空の安定性などを明らかにしたいと考えています。

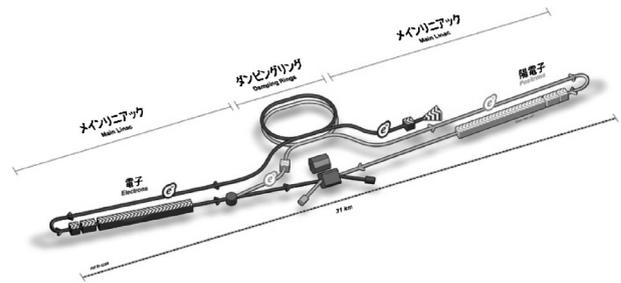


図2. ILCの模式図。電子と陽電子は中央にあるダンピングリングによって進行方向を揃えた後に両端まで輸送され、メインリニアック（主線形加速器）によって中心へ向けて一気に加速される。(イラスト ILC GDE)

東北大学では、北上サイトにほど近い地元大学として様々な調査研究を行ってきています。2013年までは、北上サイトにILCを立地することが可能であるかを明らかにするために、地質の先生方のお力を借りて地質調査を実施しました。また、ILCで必要となる長大トンネルや地下大空洞の建設可能性を探るために、本学の工学研究科の協力を得て、地下施設の建設について調査検討を行ってまいりました。北上サイトが最適であると評価された後は、ILCの具体的な建設箇所等の検討を進めています。

ILCは、とても大きな規模の計画ですので、その実現には様々な分野の方々のご理解とご協力が不可欠です。多くの産業界の方々から先端加速器科学技術推進協議会としてILCを応援して下さいます。また、文部科学省も慎重に議論を進めて下さっています。こういった動きが実を結び、ILCが実現する日を夢見て各種の検討を進めてまいります。

サイエンストピックス

海底から見上げる津波

平成 13 年宇宙地球物理学科 (地物) 卒 東京大学地震研究所 助教 前田 拓人



地震学にとって、津波は古くで新しい研究対象です。津波観測の歴史は地震波形よりもさらに古く、すくなくとも 1854 年にアメリカ西海岸の検潮記録に記された安政南海地震の記録まで遡ることができるようです。

津波といえば検潮記録の解析という時代が長く続きましたが、海底圧力計の開発と普及によって津波研究は大きな転換点を迎えます。海底津波計は、海底の圧力を高精度で計測し、津波などによる水位変化を海水の荷重変化として捉える計測機器です。測定機器そのものは古くからあるものですが、2004 年のスマトラ沖地震津波を契機のひとつとした全太平洋的な海底即時津波観測網の整備や、日本周辺で着実にすすめられてきた海底ケーブル津波計が、津波研究に大きな変革をもたらしました。衛星通信や海底ケーブル技術によって、海岸からはるか離れた深海における高さ数 cm という微小な津波を広域かつ即時的に検知できるようになったのです。

海底における記録は、津波が陸に到達するよりも早く観測できるというような即時予測のための利便性ももちろんのこと、質的にも海岸における津波記録とは大きく異なるものでした。陸域まで到達した津波は、海岸線や湾の形状によって複雑に散乱されてしまいます。そのため、海岸線付近に設置された潮位計等の津波記録波形は非常に複雑であり、それらを再現することは現代の数値計算技術と計算機をもってしても容易ではありません。しかもその波形には、観測点のごく近傍の影響が支配的であるのが常でした。一方、はるか沖合に設置された海底津波計の記録は比較的シンプルで、かつ震源での断層破壊過程をより色濃く反映しています。つまり、海底津波計の波形記録の丹念な解析から、地震断層運動(震源過程)の詳細を拘束できるというわけです。実

際、2011 年の東北地方太平洋沖地震の際に釜石沖海底ケーブルの海底津波計により観測された津波波形は、海底の震源直上で捉える津波記録がいかに震源の破壊過程を強く制約できるか、その威力を我々にまざまざと見せつけました。

しかし、津波が震源域近傍で観測されることで、かえって難しい面も現れてきました。その一つは地震波と津波とのカップリングです。地震波と津波とは伝播速度が大きく違い、特に津波は水深が浅くなると速度が遅くなります。そのため、海岸付近で津波が観測されるころには地震波は通り過ぎており、その影響はほとんど無視できたのです。ところが、震源域付近の海底津波記録には、地震波・海中音波・地殻変動に津波までのすべてがまぜこぜになって表れます。このような複雑な現象を理解するため、重力場中の運動方程式を直接解くことによって地震波の伝播から津波の生成と伝播までを統一的に再現するシミュレーション手法を開発しました(図 1)。海水とその下の弾性体の運動を 3 次元的に解くため、莫大な計算量が必要となりますが、当時世界一のスーパーコンピュータ「京」を用いた大規模シミュレーションによって、2011 年東北地方太平洋沖地震の海底津波記録の定性的な再現に成功しました。海底記録を理解するための津波発生理論や数値計算による検討が、現在も活発にすすめられています。

2011 年東北地方太平洋沖地震とその被害を受けて、東北地方日本海溝周辺には、現在世界にも類を見ないような超稠密海底ケーブル地震津波観測網(S-net)が敷設中です。フィリピン海プレート境界の巨大地震が繰り返す西南日本にも、すでに別の観測網(DONET)の一部が稼働を開始しました。これらの記録を最大限に活用して、津波と地震動の即時予測、沈み込み帯の地震発生と津波生成、そしてそれらを理解するための波動論研究が今後ますます盛んになると期待されます。

Maeda, T., and T. Furumura, *Pure Appl. Geophys.*, 170(1-2), 109-127(2013)

の図10参照

図 1. 地震・地殻変動・津波の同時シミュレーション。各図上部が海面の下部が海底の上下方向変位を表す。地震動(a, b)が広がりきった後に海面・海底に地殻変動が残り(c)、海面変位がやがて重力により押しつぶされ(d)、やがて津波として伝播していく(e)様子が確認できる。(Maeda and Furumura, 2013 より修正)

サイエンストピックス

カーボンナノチューブのスピンの軌道相互作用

平成8年物理学専攻(博前)修了 物理学専攻 助教 泉田 渉



カーボンナノチューブとは、炭素からなる、直径がナノメートル程度の円筒状の物質です。円筒面はグラファイトからなります。特に円筒面が一枚のグラファイト層(グラフェン)のものは単層カーボンナノチューブ(以下、ナノチューブ)と呼ば

れています。ナノチューブはグラフェンをある方向に巻いた構造をしており、グラフェンの六角格子列が円筒面では螺旋状に巻き上がります。巻く方向を自由に選べるため、様々な螺旋構造のナノチューブが存在します。それらのうち3分の1が金属に、残り3分の2が半導体になることが知られています。

ナノチューブの電気伝導測定は1990年代中頃から盛んに行われてきました。特に、一本のナノチューブを電界効果トランジスタ構造にすることで、電子のスペクトル測定が可能となります。数ケルビン以下の低温で温度揺らぎを抑えることにより、金属や半導体といった性質に加え、マイクロメートル長程度のナノチューブに閉じ込められた電子の離散準位が観測されてきました。そのような中、2008年、アメリカの実験グループにより、ナノチューブのスピンの軌道相互作用が報告されました。

スピンの軌道相互作用は重い原子ほど大きいことが知られています。炭素原子は軽く、従来の観測でもその兆候が認められなかったということもあり、ナノチューブでスピンの軌道相互作用が注目されることはほとんどありませんでした。2008年の報告は多くの研究者にとって意外なものだったと思います。スピンの軌道相互作用はスピントロニクスにおける基本的な相互作用でもあるため、ナノチューブの応用に向けた新たな可能性を示すことにもなりました。

炭素原子のスピンの軌道相互作用は数ミリ電子ボルト程度であることが知られています。これは温度に換算すると数十ケルビンです。数ケルビン以下における電気伝導測定の技術はすでに確立されていますので、スピンの軌道相互作用は十分観測可能のようにも思われます。しかしグラフェンのように、 π 軌道だけが伝導に寄与する場合には、もともと小さいスピンの軌道相互作用はさらに抑えられてしまいます。

しかしナノチューブの注目すべき点として、円筒面が曲がっているために π 軌道は σ 軌道と混成することが挙げられます。異なる磁気量子数の軌道が混ざるため、スピンの軌道相互作用が誘起されることが考えられます。では具体的に、ナノチューブにおい

てスピンの軌道相互作用はどのように現れるのでしょうか？

私たちは、螺旋対称性を有する系に対してスピンの自由度を取り込んだブロッホ関数の定式化を行いました。これを用いて、様々な螺旋構造のナノチューブにおけるスピンの軌道相互作用を、数値計算により調べました。また同時に、摂動論に基づき有効モデルを導出しました。これにより、アームチェア型と呼ばれるナノチューブではバンドギャップが開くこと、カイラル型やジグザグ型ナノチューブでは上向きと下向きスピンのエネルギーがサブミリ電子ボルト程度に分裂すること、分裂の大きさはナノチューブの直径に反比例するだけでなく螺旋構造に強く依存することなどを、系統的に示しました。観測当初は謎であった、電子と正孔とでスピンの軌道分裂の大きさが異なることも、私たちの理論により自然に説明されることがわかりました。

ナノチューブのスピンの軌道相互作用を理解する上で、スピンに加え、谷と呼ばれる自由度が重要です。谷とは、フェルミエネルギー近傍のバンド構造を指します。ナノチューブには2つの谷が存在するため、電子が2つの谷のどちらに在るのか、という自由度があります。ナノチューブのスピンの軌道相互作用は、2つの谷で、大きさは同じく、スピンの向きが互いに逆向きになるように現れます。スピンの軌道相互作用が観測されるためには、谷が分離している必要があります。私たちは最近の研究で、螺旋構造によって、谷が分離する場合と、2つの谷が強く結合する場合とがあることを示しています。谷が強く結合する場合にはスピンの軌道相互作用は現れず、分裂と縮退を繰り返すスペクトル構造が現れることを指摘しています。全ての測定においてスピンの軌道相互作用が観測されているわけではありませんが、その一因は上記の様な谷結合にあると考えています。

スピンの軌道相互作用が観測された背景には、高純度ナノチューブの測定が可能になったという実験技術の進展があります。これにより、金属か半導体かといった振舞いの中に潜む微細構造の観測が可能となりました。最近では大量に合成されるナノチューブの中から特定の螺旋構造のナノチューブを分離することや、特定の螺旋構造のナノチューブだけを成長させることが可能となってきています。今後の研究において、様々な螺旋構造のナノチューブの持つ多彩な量子効果がさらに明らかにされるとともに、スピントロニクスなどへの応用が期待されます。

サイエンストピックス

宇宙マイクロ波背景放射の観測による宇宙論の進展

平成18年宇宙地球物理学科(天文)卒業 カリフォルニア大学バークレー校 博士研究員 茅根 裕司



皆さんは「宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background radiation; 以下略してCMB)」という言葉を知っていますか？

現在、宇宙論はその黄金期を迎えていると言っても過言ではありません。理論とそれを検証

する実験・観測が20世紀後半から急速に進展しており、その中心を担っているのがCMBの観測なのです。過去二度に渡り、CMBの観測に対してノーベル物理学賞が授与されてきました。一度目は1978年に「CMBの発見」に対してアーノ・ペンジアスとロバート・W・ウィルソンに、二度目は2006年に「CMBが黒体放射であること、およびその非等方性の発見」に対してジョン・C・マザーとジョージ・スムートに贈られました。これらの成果は端的に言って、我々の宇宙が熱い火の玉、所謂「ビッグバン」から始まり、その後膨張をしている事を示しています。

これらCMBの成果を筆頭に様々な観測結果から、ビッグバンは疑いようの無い事実として受け入れられる様になりました。しかし、これで宇宙のすべてが分かった訳ではありません。近年はCMB「偏光」の観測による「インフレーション」の解明と「宇宙の構造形成」の解明を目指した観測が世界中で進められており、様々な実験が凌ぎを削っています。私が参加しているPOLARBEAR実験もその一つです。

POLARBEAR実験は米国のカリフォルニア大学バークレー校が中心となって進めている実験で、私は2011年に東北大学を修了した後、同校に渡り実験に参加しています。2014年3月POLARBEAR実験は、この度の受賞理由にもなった「CMBの偏光観測から重力レンズ効果による偏光パターンの測定」についての論文を公表しました。この成果は、宇宙の構造形成を「重力レンズ効果」を通じ、「空の細かな角度スケール」で「CMBのBモード偏光」という形で始めて観測したものです。2015年のノーベル物理学賞を梶田隆章氏とアーサー・B・マクドナルドが「ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見」で受賞したように、現在はニュートリノに質量がある事が知られています。これは標準理論を超える物理を示唆しており、現代物理学の課題の一つでもあります。このニュートリノは宇宙の構造形成にも影響を与える事が知られており、「CMBのBモード偏光」を観測する事でその質量を測る事が可能です。今回の我々の成果は、将来のニュートリノ質量の精密測定の足がかりとなるものと言えます。

POLARBEAR実験の成果発表の一週間後、ハーバード大学を中心としたBICEP2実験が「CMBの偏光観測から宇宙のインフレーションによる偏光パターンを測定」したと報告しました。これは、宇宙のインフレーションの痕跡を「空の大きな角度スケール」で「CMBのBモード偏光」という形で始めて観測したものです。現在の宇宙論では、ビッグバン以前に宇宙が指数関数的な膨張をしたとするインフレーション理論が支持されています。ビッグバンは確かに宇宙の多くを説明してくれますが、その初期条件については何も語りません。また観測された宇宙が極めて平坦であること(平坦性問題)や、相対論的に因果律を持ち得ない離れたスケールに渡って宇宙が一様であること(地平性問題)等の謎も残りました。インフレーション理論は、これらの問いに答えを与えてくれます。こういった理由でインフレーション理論が支持されている一方、インフレーションが観測的に「直接」検証されたことはありませんでした。BICEP2実験の成果は、直接検証という研究者の悲願を達成したものであり、この結果は瞬く間に世界を駆け巡り、人々を熱狂させました。POLARBEAR実験の成果も誇れる物であるという自負はありますが、我々の成果がこの衝撃の影に隠れてしまった感は否めません。まして、後になってBICEP2実験の結果は誤りであったことが分かった今になっては、なんともやるせない気持ちで一杯です。

BICEP2実験の結果は空振りに終わった訳ですが、CMB偏光観測によるインフレーションの検証が不可能になった訳ではありません。BICEP2実験も汚名返上の為に、更なる観測を進めています。我々POLARBEAR実験もニュートリノ質量の測定を目指した観測と同時に、現在はインフレーションの検証に繋がる空の大きな角度スケールでの観測も行っています。また、最近では日米を中心にインフレーションの検証に特化したCMB偏光観測衛星LiteBIRDの打ち上げを目指した研究も行っております。遠くない将来、POLARBEAR実験またはLiteBIRD衛星による「間違いない」検証成功のニュースを皆様に届けられるよう、研究に邁進してまいります。

受賞に際しPOLARBEAR実験の皆様は元より、天文学や宇宙論、CMBについて教授して下さいました服部誠准教授を始め東北大学天文教室の皆様、CMB実験に自ら参加する機会を下さった羽澄昌史教授を始め高エネルギー加速器研究機構CMBグループの皆様、そして米国で研究する場を提供して下さいましたエイドリアン・リー教授を始めカリフォルニア大学バークレー校の皆様がこの場を借りて御礼申し上げます。

サイエンストピックス

火山噴火のダイナミクス：火道流の数値モデリング

地球物理学専攻 助教 小園 誠史



火山噴火現象には、溶岩流の流出や溶岩ドームの形成を伴う穏やかな噴火から、巨大な噴煙や火砕流を伴う爆発的な噴火に至るまで、非常に幅広い多様性があります。この多様性はダイナミックな自然現象としての火山噴火の魅力となっている一方で、

様々な火山災害をもたらし、また噴火の推移予測を困難にする一因にもなっています。火山噴火の多様性の成因を明らかにすることは、複雑な自然現象に内在する物理過程を理解するという純粋科学としての意義はもちろんのこと、噴火の推移予測や火山防災・減災にも貢献する重要な研究課題です。

珪長質マグマによる噴火においては、上記の両極端な噴火タイプが一連の噴火過程で生じることがあります。かつて、これらの噴火タイプの違いは、火山体下深部のマグマ溜まりに蓄積されているマグマの違いをそのまま反映していると考えられていました。具体的には、マグマが水などの揮発性成分を多く含む場合、減圧によってその揮発性成分がガスとして析出しマグマが発泡・膨張することで爆発的噴火が駆動される一方で、マグマ中の揮発性成分が少ない場合はその駆動力が低く穏やかな噴火になる、という考え方です。ところが、1980年代以降、斑晶(マグマ溜まりで成長する結晶)内のメルト包有物分析などが可能になったことで、爆発的噴火によって噴出した軽石などの火砕物と、穏やかな噴火によって流出した溶岩岩片は、どちらもマグマ溜まりで同程度(約3-6 wt%)の揮発性成分を含むマグマを起源としていることが明らかになりました。その結果、珪長質マグマにおける噴火タイプの多様性や分岐に重要な役割を果たしているのは、マグマ溜まりから地表までの火道内におけるマグマ上昇過程(火道流)であることが指摘されるようになりました。

気泡・メルト・結晶からなる気液固混相流である火道流には様々な物理過程が内在し、それが噴火の多様性に深く関連しています。減圧に伴うマグマの発泡・膨張が促進されると、火道流は高粘性マグマ中に気泡が分散する気泡流の状態から、マグマの「破碎」を経て、低粘性のガス中に火砕物が分散する噴霧流の状態に変化します。破碎したマグマが高速で火口から噴出することで、爆発的噴火に至ります。一方、気泡流において気泡同士の連結などの効果によってマグマからガスが効果的に分離(脱ガス)すると、マグマの膨張は抑制され、マグマは破碎されずに高粘性・低速のまま地表に流出し、穏やかな噴

火となります。また、マグマ上昇中には結晶化の効果によってマグマの実効粘性が急激に変化し、これも火道流の流動様式に大きな影響を与えます。

我々は、マグマ上昇中の発泡・脱ガス・結晶化過程がすべて考慮された火道流数値モデルを開発し、これらの物理過程が噴火の多様性に与える影響を調べました。解析では、マグマ溜まりとそれに連結する火道からなるシステムにおいて、マグマ溜まりの圧力と火道内のマグマ流量(つまりマグマ噴出率)の関係を考えます。定常火道流の状態では、マグマ溜まり圧力が増加するほど流れの駆動力が増すためにマグマ噴出率も増加する、という関係が一般的に成り立ちます。しかし、発泡・脱ガス・結晶化の効果によって、マグマ溜まり圧力の増加とともにマグマ噴出率が減少するという負の相関関係が生じることがあり、これは火道流が「負性抵抗」の性質をもつことに相当します。この場合、火道流は不安定になり噴出率の急激な変化や振動現象が生じます。我々は火道流モデルの解析に基づき、マグマ噴出率が増加すると、①結晶化の遅れによってマグマの実効粘性が減少(火道壁からの摩擦抵抗が減少)する効果、あるいは②脱ガスの非効率化によってマグマ密度が減少(マグマ荷重が減少)する効果によって、さらに噴出率が増加するという正のフィードバックメカニズムが、火道流の負性抵抗をもたらすことを明らかにしました。また②の効果は、マグマ噴出率や火道内のマグマ発泡度・過剰圧力の急増を伴う火道流の時間発展変動をもたらすことがわかりました。これを穏やかな噴火から爆発的噴火への遷移過程とみなすことができます。このように、火道流モデルによって多様な噴火タイプ間の遷移過程を再現し、その遷移が生じる臨界条件や時間スケールを調べることが可能になりました。

最近では、噴火メカニズムのより実証的な解明のために、火道流モデルと観測データの統合をめざした研究が進められています。火道流の直接観測自体はほぼ不可能ではあるものの、火道流を支配するマグマ物性や地質条件、また火道流がもたらす地殻変動などは、物質科学的、地球物理学的手法などに基づく多項目観測による推定が可能です。これらの観測による火道流プロセスへの制約条件を火道流モデルに適用することで、噴火推移の予測精度を向上していくことが今後の大きな課題です。

本稿は、第7回泉萩会奨励賞の受賞を機に執筆の機会を頂いたものです。ご審査いただきました先生方、泉萩会会員の皆様、また共同研究者の皆様に、厚く御礼申し上げます。