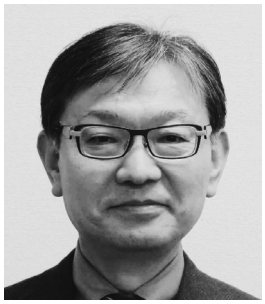
サイエンストピックス

地球の放射収支と気候

1988年地球物理学専攻修了　東北大学　理事・副学長（研究担当）　早坂　忠裕



1995年の最初の発見以来、太陽系外に存在する惑星が多数見つかっています。また、太陽系内の惑星についても、近年は、人工衛星による探査が進み、大量の氷の層やその下に液体として存在する水、さらには活発な火山活動などが観測されるようになりました。このような時代において、あらためて地球を惑星の一つとして考えて見たいと思います。

地球の表層、すなわち大気と地表面（海洋、陸地）で生じている複雑な現象のエネルギー源は、99.9％以上が太陽放射（短波放射）によるものです。太陽から地球に届く短波放射の約30％が宇宙空間に反射され、約20％強が大気によって吸収され、残りが地表面に吸収されます。大気と地表面で吸収された短波放射は地球放射（長波放射）として、最終的には宇宙空間に射出されます。その間に、地表面と大気の間では放射、潜熱、顕熱の形でエネルギーのやりとりをします。これらのエネルギーの流れの時空間による違いが風や海流、また、蒸発や降水を生じさせることになります。その結果、地球全体では大気上端における放射エネルギー収支が概ねバランスしています。

ところで、大気上端に入射する短波放射エネルギーは年間で平均すると北半球と南半球で同じになります。地球の公転軌道は楕円ですが、ケプラーの第二法則により、地球と太陽の距離が近いと地球は早く動き、遠いと遅く動きます。その結果、距離が近い「秋分の日～冬至～春分の日」の期間は「春分の日～夏至～秋分の日」の期間よりも１週間程度短くなります。これは、天文学的に決まることですが、一方で、最近の人工衛星による観測から、大気上端で反射される短波放射エネルギーも北半球と南半球でほぼ同じ（差は0.2％以内）という研究結果があります。ご存知のように、地球の海陸分布は両半球で異なり、海面に比べて陸面の方が反射率は高いので、半球間でもっと大きく異なることが予想されます。ところが、雲の時空間変動の結果、バランスがとれて大気上端においては、両半球でほぼ同じ反射率になると考えられています。

短波放射エネルギー収支の地理的分布を詳しく見ると、大気上端における反射率は熱帯の赤道付近および中高緯度で大きな値になります。一方、亜熱帯では小さくなります。これは、熱帯収束帯で雲量が大きく、亜熱帯高圧帯で雲量が少ないこと、また、中高緯度では低気圧や前線による雲が多いこと、そして南極域では大陸上の雪氷の面積が大きく、北極域では下層雲が多いことを反映した結果になっています。短波放射の時空間変動には、雲以外にエアロゾル、水蒸気、窒素、酸素などの大気を構成している他の物質も関係します。

雲の分布は大気上端から宇宙へ射出される長波放射の時空間分布にも大きく影響します。すなわち、雲頂の高い雲があると地表面や下層大気から射出された長波放射はその雲によって吸収され、雲頂の低い温度に対応した長波放射が射出されるために宇宙空間に出て行く長波放射エネルギーは小さくなります。一方で、雲がない地域では地表面や下層大気から射出された放射がある程度大気を透過するので比較的大きな長波放射エネルギーが宇宙へ出て行きます。

このような短波・長波放射の収支は地球温暖化問題や気候変動と大きく関係しています。衛星搭載の高分解能分光放射計による1970年と1997年の観測データを比較すると、雲がない晴天域において、二酸化炭素やメタンの吸収帯がある波長域では宇宙へ射出される長波放射エネルギーが減少しているのに対して、吸収が無い窓領域においては逆に放射エネルギーが増加しています。これは、いわば人為起源温室効果ガスの増加による地球温暖化現象の直接的証拠と言えるでしょう。

地球の表面は約2/3が雲に覆われているので、大気上端における長波放射エネルギーの収支は時空間変動が大きいのですが、長期変化に着目すると、北半球高緯度においては宇宙空間に射出される長波放射エネルギーが明らかに増加する傾向が、近年、観測されています。これは、北半球高緯度の地上気温や対流圏下層の温度が上昇していることに起因するものと考えられます。しかしながら、地域によっては減少しているところ、増加しているところが複雑に分布しており、全体ではほぼ釣り合っているという評価になっています。

短波放射について見ると、長波放射と同様に北半球高緯度における変化が顕著になっています。すなわち、雪氷面積の減少により、大気上端における上向き短波放射エネルギーは減少傾向にあることが示されています。また、雲による影響は長波放射の増減とは逆になり、雲量が増加している地域では上向き短波放射は増加しますが、雲頂温度は地表面の温度よりも低いので、長波放射は減少します。以上は、大気上端における放射収支の特徴ですが、大気下端すなわち地表面における放射収支はどうなっている

のでしょうか。基本的には、雲があると反射が大きく、透過する短波放射雲は少なくなるので、大気上端での特徴と同様に雲の分布が大きく影響します。しかしながら、地表面における下向き短波放射がゼロになることはありません。水または氷の粒子で構成されていますが、物質としての水は気体（水蒸気）、液体（水）、固体（氷）いずれの状態でも、可視域の光に対しては吸収が極めて弱くほとんど吸収しないと言っても良いという特徴があります。その結果、雲がどんなに厚くなっても散乱光が透過し、地表面に到達することになります。

一方、地表面における大気からの下向き長波放射は短波放射の場合とは大きく異なり、雲の分布を反映しない地理分布になります。これは、大気からの長波放射は水蒸気や雲など大気を構成する物質からの熱放射なので大気の温度に依存すること、また、地球の大気の温度に対応する熱放射の波長域においては水蒸気の吸収帯が大きく影響することによります。大気中の水蒸気は下層に多く存在し、また、一般的に気温も対流圏においては下層で高くなるので、上層の雲による影響が小さくなるためです。その結果、地表面における下向き長波放射は雲の分布によらず、夏半球の広い範囲で大きな値となります。

以上のように、大気を構成する気体分子や雲、エアロゾルの特性およびそれらの分布と変動により、短波・長波放射エネルギー収支が変動することがわかります。最初に、地球全体で平均すれば、大気上端での収支は、ほぼバランスが取れていると説明しました。また、地表面においても、放射エネルギー、顕熱・潜熱エネルギーの収支が概ね均衡がとれていると考えられていますが、現実には、わずかに不均衡が生じます。現在の研究では、地表面における熱収支は均衡が取れておらず、特に海洋がわずかに熱を吸収していて、その結果、温暖化現象を緩和していると考えられています。海洋は大気や陸地に比べると熱容量が極めて大きく、熱を吸収しても温度に反映されにくいという特徴があります。地球温暖化は一見顕著に現れていないように見えますが、海洋表層数百メートルの貯熱量を調べると、確実に温暖化していることがわかります。また、過去120年の間に噴火した巨大火山起源のエアロゾルによって日射量（地表面における下向き短波放射エネルギー）が減少したことが海洋表層に記憶され、このことも地球温暖化を遅らせる一因となっています。

最近の放射収支に関する研究の話題の一つに、日射量の長期変動に関するものがあります。1957～58年の国際地球観測年（International Geophysical Year, IGY）を契機に1950年代の終わりから世界中の気象官署で日射量の観測が開始されました。これらの観測データから、1960～1980年代の間に世界の多くの場所で日射量の長期減少傾向が観測されました。その後、欧米や日本では日射量が回復しましたが、中国では1990年過ぎまで減少が続き、一旦回復したものの、2000年代に再び減少傾向になりました。ちなみにインドではこの間、連続して減少傾向にあります。これらの要因としては、大気汚染などによるエアロゾルの増加が重要だと考えられています。エアロゾルは、雲凝結核として機能するので、雲を変質させたことも考えられます。不思議なことは、日射量の減少傾向は大気汚染が激しい地域のみならず比較的清浄な大気と考えられる地域においても観測されていることです。そのメカニズムについて最終的な理解を得るには至っていません。

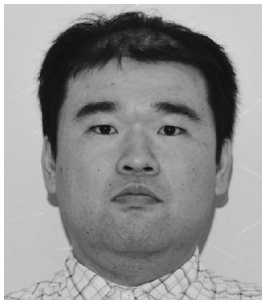
原因は何であれ、このような日射量の長期変動は気象官署で同時に観測されている総蒸発量の観測でも明らかです。日射計による長期観測は、測器の劣化、検定、観測方法などにより誤差が生じる可能性がありますが、総蒸発量の長期変動が日射量の長期変動と整合的であるので、これらの観測は信頼できるものと考えられています。一方で、日射量の変動は海面からの蒸発量にも影響を及ぼします。全球の海域からの蒸発量は1960～70年代に減少し、1980～2000年代に増加、その後、再び減少したと推定されています。これに対応するように、海域における降水量も年々変動は大きいものの1980年から2000年にかけて増加しました。その後は明確な増減傾向が見られないような変動を示しています。蒸発した水は凝結して降水となり、地表面に戻りますが、その際に大気中に潜熱を放出します。降水をもたらす水蒸気の収束は大変効率が良く、凝結による潜熱の放出量は降水量から求めることができます。その値は、1 mm/dayの降水で28.9 W/m^{2}の潜熱エネルギーになります。近年では集中豪雨の頻度が増加しており、１時間あたり50 mmを超えるような豪雨も比較的頻繁に観測されるようになってきました。1 mm/dayで28.9 W/m^{2}ですので、50 mm/hは34680 W/m^{2}という莫大な潜熱の放出を意味します。降水領域は時間的にも空間的にも限られていますので、全球平均では年間1000 mmの降水になり、潜熱の放出は約80 W/m^{2}ということになりますが、地球上の様々な場所ではホットスポット的に大気を加熱していることになります。

以上のように、地球は太陽からの短波放射エネルギーを受け取り、宇宙空間に長波放射を射出します。その過程で風が吹き、雲ができて雨が降るなど、大気・海洋の様々な現象が生じています。これらの現象を、人工衛星の多様なセンサーなど、最新の技術で観測されたデータやスーパーコンピューターによる数値モデルを用いることにより研究を進め、惑星としての地球をもう一度考えるということも有意義なことではないでしょうか。

サイエンストピックス

光子ビームによるハドロン物理の探究

東北大学電子光理学研究センター　助教　石川　貴嗣



ハドロンとは、自然界の四つの力のうち強い相互作用を受ける複合粒子です。陽子や中性子といった原子核を構成する核子がもっともなじみ深いかと思います。ハドロンの構成要素は、素粒子であるクォークとグルーオンであることは間違いないのですが、どのような状態であるかはあまりわかっていません。クォークとグルーオンの運動は量子色力学 QCD という基礎理論で記述されますが、低エネルギーで結合定数が非常に大きくなるため摂動的な計算ができず、ハドロンの構造の理解が難しくなっています。わかっているのは、QCD が導入した（光の三原色との類似性から名付けられた）カラーが一重項（無色）でなければハドロンとして存在できないことです。現在確立しているハドロンは、クォークと反クォークの成分を主とするメソン（色と反色で無色）とクォーク三つ（赤と緑と青で無色）を主成分とするバリオンの二種類です。電子光理学研究センター ELPH では特にバリオンを系統的に調べるため光子ビームによるメソン光生成反応を推進しています。高エネルギーの光子ビームを陽子あるいは中性子に照射し、バリオンを生成します。ここで生成されたバリオンは不安定なのでメソンと核子にすぐに崩壊します。終状態のメソンと核子から中間状態のバリオンについての知見を得るわけです。

ELPH ではこの高エネルギー光子を供給するビームラインを二つ保有しています。その二本目の開発と整備に携わってきました［T. Ishikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **622**, 1(2010); *ibid* **811**, 124(2016)］。ELPH の光子ビームは、炭素ファイバーを円形加速器（シンクロトロン）中で周回する電子ビームに直接挿入して制動放射線を発生させています。素通りした電子ビームは、再びラジエータに衝突させられ、無駄なく電子ビームを光子ビームに変換できます。その反面、光子ビームの強度を一定に保つのが難しく、ラジエータの位置を高精度に調整し続けなければなりません。我々の実験では π^0 と η メソンが主な対象ですが、これらは二つのガンマ線に崩壊します。これらのエネルギーと方向を測定するために電磁カロリメータ FOREST を建設しました［T. Ishikawa *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **832**, 108 (2016)］。架台はすべて学生や教員らで自分ら作ってきたものです。ようやく全体が完成して、バリオン分光のデータを少ないながら一通り取得したところで罹災しました。ビームラインや FOREST の再整備といった苦難の時期が続きました。新たに作るのは楽しいですが、一度作って壊れたものを修理するのは、なかなかやる気が起きません。また取得したデータの解析にもそれなりに時間がかかり、海外の同じような施設から、やろうとしていたことの結果が次々に報告されていきます。これでは ELPH でやって来たことは何だったのだろうという悲愴感が生じてきました。

幸いにして FOREST 実験ではデータ収集のトリガー条件を緩くしていました。ひとたびデータを取得すれば、解析でいろいろな反応過程を引き出すことが可能でした。そこで注目したのが $\gamma d \to \pi^0\pi^0 d$ 反応です。$pn \to \pi^0\pi^0 d$ 反応の中間状態に 2380 MeV の重陽子の共鳴状態 $d^*(2380)$ が見られるという報告が COSY-at-WASA collaboration から報告があったことで解析してみました。残念ながら統計量が少なく $d^*(2380)$ ははっきりとは確認できませんでしたが、この反応過程の報告はまだなく「**世界初測定**」を謳うことができました［T. Ishikawa *et al.*, Phys. Lett. B **772**, 398(2017)］。$d^*(2380)$ は観測できませんでしたが、$\pi^0\pi^0 d$ 系でみた重陽子の励起関数は二山構造をしており、$\pi^0 d$ 部分系では 2150 MeV 程度の共鳴状態が見られました（下図参照）。$\gamma d \to \pi^0\eta d$ 反応でも、$\pi^0 d$ 部分系で 2150 MeV、ηd 部分系でも 2400 MeV 未満に共鳴状態が見られています。どうやら、重陽子標的での二つのメソンと重陽子を終状態にもつ光生成反応では、重陽子の励起状態が観測しやすいようです。現在、これら新しい結果についての投稿論文を準備しているところです。さて重陽子の励起状態と言いましたが、それはどのようなものでしょうか？ メソンを放出して崩壊するので、陽子と中性子だけからなる通常の原子核ではありません。二つの核子とメソンからなる状態でしょうか？ あるいは六つのクォークが密になったものでしょうか？ この特異な状態の構造を実験的に解明するべく、今後も震災後に復旧するだけでなく拡張した FOREST を使って光子ビームによるハドロン物理を探究する実験やっていきたいと思います

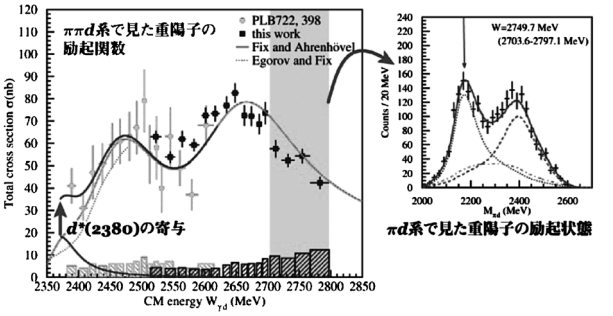
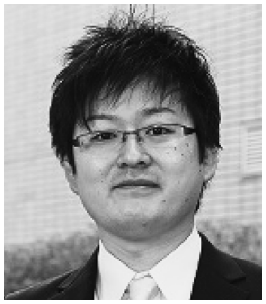


図　$\pi^0\pi^0 d$ 系と $\pi^0 d$ 系で見られる重陽子の励起状態。

サイエンストピックス

ハイパー核崩壊パイ中間子分光法の確立と荷電対称性の破れの研究

平成21年物理学科卒　東北大学高度教養教育・学生支援機構　助教　永尾　翔



我々の住む世界にある物質はどこまで細かくすることができるだろうか？ 例えば原子は原子核と電子から構成されています。原子核は陽子と中性子で構成され、さらに陽子・中性子はアップクォークとダウンクォークと呼ばれるこれ以上分割できない粒子（素粒子）から成ります。現在までの研究から、クォークには全部で6種類あり、その組み合わせから、陽子・中性子と同様な特徴を有する粒子が大量に存在することが分かっています。そして、その中のラムダ粒子は陽子・中性子と組み合わさってラムダハイパー核と呼ばれる非常にユニークな原子核を構成します。

ラムダ粒子は陽子・中性子とどのように相互作用するか？ ラムダハイパー核はどのような原子核なのか？ 1970年頃より粒子加速器を用いてラムダハイパー核を生成し得る極限環境を作り出し、その特徴・構造を調べる研究が行われてきました。原子核の中でも特に特徴あるこのラムダハイパー核を把握できれば、この世界の主構成要素のひとつである原子核を統べる知見を得ることができるはずです。しかし未だ､未解決の部分が多くあります｡そのひとつが｢荷電対称性の破れ」です。

陽子－陽子・中性子－中性子の間に働く力はほぼ同じです。これは原子核を説明する上で最も基本的な特徴で、1930年代にハイゼンベルグが提唱した荷電（アイソスピン）対称性の基礎となったものです。しかし、ほぼ同じと書いたように厳密には違います。この違いを「荷電対称性が破れ」と呼んでいます。この破れは陽子と中性子の質量差（厳密にはアップクォークとダウンクォークの質量差）によって比較的説明できることが知られています。同様にラムダ粒子－陽子・ラムダ粒子－中性子の間に働く力も異なります。しかし、上述の場合との違いは、「説明できないほど大きく異なる」ということです。この問題は、ラムダハイパー核研究の黎明期から現在に至るまで未解決の問題として残されています。

この問題が未解決のまま残されている原因のひとつは､測定の困難さにありました。実験は1970年頃、写真乾板を用いて行われ、水素3原子核にラムダ粒子が束縛した水素4ラムダハイパー核とヘリウム3原子核に束縛したヘリウム4ラムダハイパー核においてラムダ粒子がどれほど安定的に束縛されているかという量（束縛エネルギー）が大きく違うという報告がなされました。しかし、系統的不定性に関する記述に乏しく、測定がどの程度正確かわかりませんでした。ところが同手法より高精度を達成し得る手法が無いため、結論が先送りにされていました。

このような状況の下、我々は「ハイパー核の崩壊パイ中間子分光」という新しい手法を考案しました。この手法の最大の利点は、ラムダハイパー核崩壊後の粒子（パイ中間子）の運動量を精密に測定することだけで崩壊元のラムダハイパー核の質量を決定できる点です。計算上この手法は成立するのですが、実際は低運動量の粒子を集め、高分解能のもと測定することは難しく、これまで誰も挑戦したことがない手法でした。この困難を打破すべく、我々は近年手法が確立した「電子線を利用したハイパー核電磁生成」を応用しました。マインツ大学にある大強度連続電子線加速器MAMI-Cと高分解能・高統計を両立すべくデザインした^{9}Be薄膜によって大量のラムダハイパー核を生成し、ハイパー核の崩壊によって放出されたパイ中間子を高さ10 mの巨大な高分解能スペクトロメータで測定することで、世界で初めて水素4ラムダハイパー核の超高分解能測定に成功しました（図1)。実験で使用した機器の美しい写真が「日本物理学会誌 2013 VOL.68 No.9」の表紙を飾りましたので、ご覧いただけると幸いです。

この実験結果は、水素4ラムダハイパー核の束縛エネルギーを世界最高精度で確定するとともに、荷電対称性の破れを解明し得る重要なデータとなりました。この研究を通して、原子核研究を大いに進展しうる素晴らしい手法を確立できました。今後も素晴らしいデータを発表できるよう研究を進めていきます。

末筆ながら、本研究を進める上で指導いただいた東北大学原子核研究室の中村哲教授をはじめ、協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

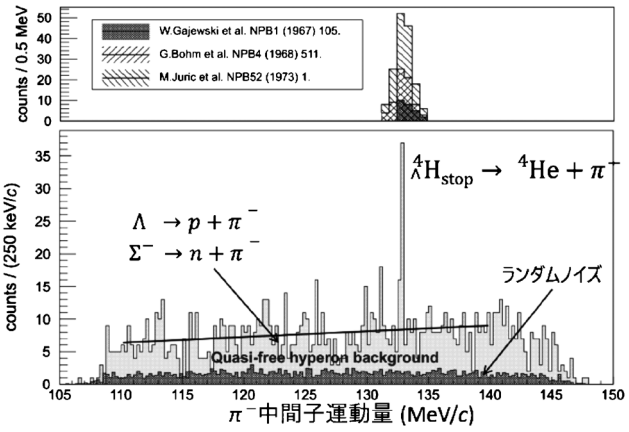


図1　ハイパー核崩壊パイ中間子分光による水素4ラムダハイパー核の結果。これまでの写真乾板の結果（図上部）と比較して10倍の分解能を達成。