

201805-07 雷原子核

雷による原子核反応

「雷が反物質の雲をつくる」

2017年11月、「雷が反物質の雲をつくる」と称する京都大学研究成果のプレス発表が報道された。雷といえば気象の話で、反物質といえば素粒子や宇宙の話であり、いったい何事かと思つて調べると、「反物質」とは陽電子のことであつた。陽電子は一般の放射線にもあるし、いまは放射線治療 PET にも使われている。反陽子か反中性子が反物質であり、陽電子を反物質と呼ぶのは適當ではないが、雷が原因で、素粒子や原子核の反応がおこる様子をとらえたというのには興味が惹かれる。

フランクリンの凧から情報機器の安全対策まで

この機会に、身近すぎて、科学的な解明があまり語られない雷研究の歴史を振り返っておく。雷が摩擦電気と同じものだと実験で示したのはフランクリンの凧実験であり、1752年頃である。稲妻放電は人間的には瞬時の現象なので観測が難しかったが、19世紀末の高速写真術の進歩によって科学的な観測が始まった。放射線の霧箱検出器で有名なウイルソンが大気中の電場を測定したのは1920年頃だった。トランジスターや半導体検出器の進歩を受けて、1990年代から雷観測のハイテク化が進み、時間分解能数マイクロ秒で雷発達の経過が観測できるようになった。また、雷研究の従来のも動機は送電線への落雷回避であつたが、情報通信の半導体機器の使用が広がるにつれて、それらへの雷の影響回避の必要性も高まり、雷研究が盛んになってきている。

雷を宇宙から見下ろす

気象、資源探索、核実験監視、偵察などの多くの人工衛星が大気を上から常時見ているし、スペースシャトルも地球を見下ろす観測をしている。当然、雷も見える。全世界で一秒間に平均30-100個の稲妻が起こっており、1日で9百万回、あるいは $6\text{km}^2 \text{年}^{-1}$ の頻度である。専門家にCGを見せてもらったことがあるが、宇宙空間から見ると、地球の赤道から中緯度の南北にかけて、陸と海の区別はあまりなく、絶えずチカチカと光っている。太陽系では木星が雷惑星であるが、地球も雷惑星なのである。

上にのぼる稲妻スプライト

上から雷をみるようになって、雷雲と雷雲、雷雲と地上の放電と同時に宇宙空間に向けて巨大なジェット状の発光現象が発見された。これらの上方発光現象は稲妻全数の数万分ぐらい稀なことだが、図に見るようなスプライトとかエルビスとかの愛称で呼ばれる 100km にもおよぶ巨大な発光現象である。

核実験監視衛星が宇宙のガンマ線バーストを偶然に発見した話は有名だが、今では重力波天体でもガンマ線バーストが見つかり、中性子星やブラックホールを解明する重要な現象になっている。くわえて最近では雷もガンマ線バーストをおこすことが分かってきた。

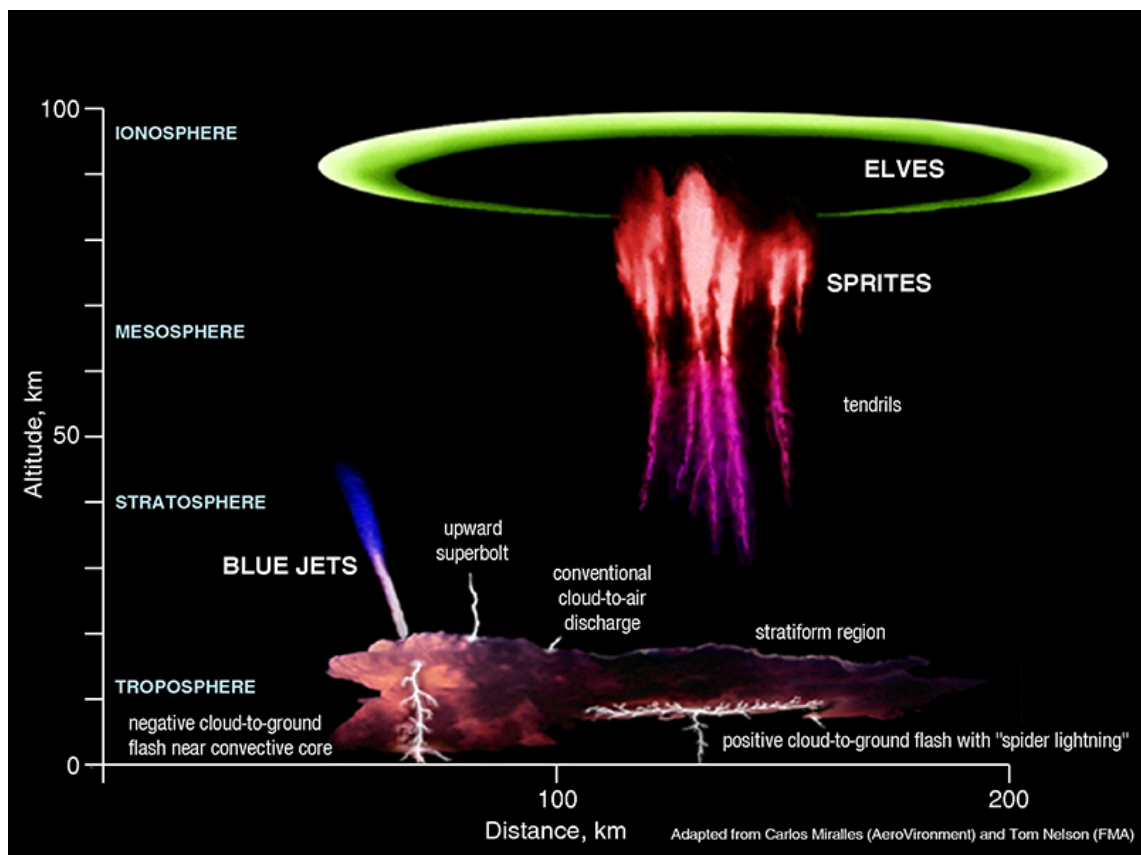


図1：エルビス (ELVES) やスプライト (SPRITES) は 1992 年にスペースシャトルのビデオカメラが初めて撮影した。下の方(高度 10km ほど)に描かれているのが対流圏でおこる普通の落雷。図出所 NOAA(米海洋大気庁)の HP。

雷と高エネルギー現象

人工衛星による雷の研究が米国で進む中、日本の観測陣は北陸冬期の雷とともにガンマ線の地上観測をしている。敦賀の原子力施設の環境放射線監視の

なかで、施設からの放出がないのに、しばしば環境放射線の上昇が起こることが1993年頃から指摘された。2000年頃から「雷で高エネルギー粒子が発生するか？」が宇宙線の研究者の間でも話題になった。こうした中で「もんじゅ」施設の鳥居建男が雷電場でのシミューションをやって、北陸の低空の雷雲では地上に達する放射線が発生することを2003年頃に明らかにした。

X 天文学観測陣も参入

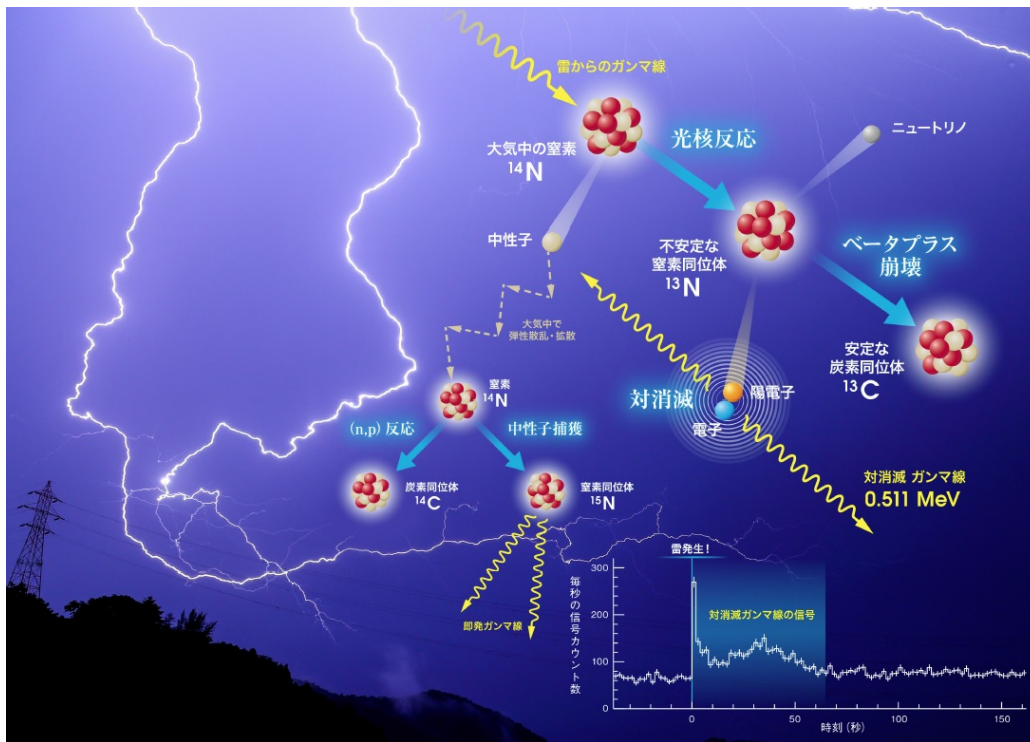
2007-09年、理研のX線天文学の観測陣が柏崎刈羽原発と乗鞍観測所で雷雲からの放射線増加を観測した。これは稲妻とミリ秒オーダーで同期した人工衛星が確認した雷のガンマ線バーストと違うもので、雷雲の中で一分ぐらいにわたって起こっていることが確認された。鳥居の扱った敦賀の事象もこのタイプである。

現在、雷や雷雲による高エネルギー現象には「短時間バーストS」と「長時間バーストL」の2種類あることが分かっている。日本のチームはLの方を追いかけていることになる。雷研究の盛んな、米国でも雷雲のなかに風船で測定器を投入してみたり、雷雲に覆われた高山山頂などで観測が行われおり、日本でも富士山山頂でが行われている。

「雷が陽電子の雲」

こうした最近の活発な雷研究の歩みを経て、冒頭に記した発見があったのである。この観測の結果は図にまとめられている。まず雷がガンマ線を発生し、続いて一連の結構複雑な原子核反応が起こり、生成された不安定な原子核から陽電子が発生するのである。これらの反応全体が雷の起こった地点の近くで起こるのである。

図2:2017年11月24日に京都大学などの観測グループ(榎戸特定准教授など)がプレス発表で配布したもの。この図の説明は本文にある。(京大HP「研究・産官学連携」より転載)。



「短時間バースト S」と「長時間バースト L」

観測で明らかになったのは雷の落雷時に同期したガンマ線の「短時間バースト S」とその後の「長時間バースト L」の2種類あることが分かっている。

「短時間バースト S」は1秒ほど続く雷光の前に1秒以内で起こるバーストである。一方、「長時間バースト L」とは雷光から数十秒後に1～2分の期間持続してガンマ線が観測される。昨年11月発表の新発見はこの後者の「長時間バースト L」のエネルギー・スペクトルの中に、電子・陽電子対消滅であることの証拠である特徴的なエネルギーをもつガンマ線を発見したことである。これまでも「長時間バースト L」は日本でも米国でも行われていたが、エネルギー・スペクトルの観測がこれ迄よりもエネルギー分解能のいい測定器で観測したことがこの成果に結びついたのである。

核反応の連鎖

雷でなぜ高エネルギー現象が起こるのかの説明は次回にすることにして、ここでは「短時間バースト S」で発生したガンマ線を出発点とする反応の連鎖を図2に沿って見ていこう。

図2の上部真ん中あたりに書かれている「雷からのガンマ線」が大気の七割を占める窒素 ^{14}N との光核反応によって、中性子を放出し、「不安定な窒素同位体」 ^{13}N になる。他方、大気分子と衝突を繰り返して減速された中性子は、窒素の原子核に吸収されて α 粒子を放出して ^{14}C になるか、あるいは「中性子捕獲」反応で ^{15}N になる。これらは何れも不安定核であるが、 ^{14}C は年代測定で有名なもので半減期は5千年と長いのでこの雷ガンマ線とは関係ない。「中性子捕獲」反応で出来た状態は ^{15}N の励起状態だが二個の「即発ガンマ線」をだして安定な ^{15}N になる。そして不安定な ^{13}N は「ダブルプラス崩壊」で陽電子とニュートリノを放出して「安定な炭素同位体」 ^{13}C に変化する。この陽電子と電子（原子の電子）の対消滅で一定エネルギーの「対消滅ガンマ線」を放出する。これが今回の観測で初めて確認したガンマ線である。

「長時間バースト L」

普通、原子核反応の連鎖の時間間隔は非常に短いものであるが、 ^{13}N の半減期が例外的に長いゆえにゆっくりしたものになる。また中性子捕獲にも時間を要し、空間的にも広がる。このために雷とほぼ同期した「短時間バースト S」の後の余韻のようにして「長時間バースト L」が数分続くのである（図2の右下のグラフを参照）。

空気中のイオンと電子

人類は昔から落雷被害で感電を経験していたが、それが摩擦電気の感電と同じだと見抜いたのがフランクリンの凧の実験であった。そして雷という電気装置は高エネルギーの素粒子反応を引き起こす天然の加速器であることが最近分かってきたのである。

電線を電流がよく流れるのは金属中に自由に動ける電子が多く含まれているからである。空気は、1cc 当たり 10 個ぐらいのわずかなイオンや電子を含んでいるだけで、よい絶縁体である。それでも乾いた冬の日にはドアノブの金属の先端にそれ溜まって、触れるとビリッと感電する。あれは空気中の静電気がそこに集積されたかからだ。地面の放射性元素と宇宙線が絶えずイオンや電子を生成し、また絶えず消滅する、そのバランスである数存在するのだ。

積乱雲の大気運動で雷の発生

空気は分子大気とチリの様な微粒子から成る。分子気体の運動と微粒子の運動には差がある：小さい微粒子は分子気体と一緒に動くが、大きな微粒子は重力で下に向かう。このために積乱雲での大気の上昇の中でも一緒に上昇する微粒子と落下する微粒子があり、互いに衝突し（擦れ合い）、摩擦電気がおこる。このために、上下方向に電荷が分離して電場が生ずるのである。

雷の電場は 50-100kV/m ぐらいが普通だが、ときに 200kV 以上になると高エネルギー粒子への加速が起こる。電場が 2-3 MV/m を越えると絶縁破壊がおこり落雷となる。線状の領域で電流による加熱が起こって発光しまたそこが膨張するのでゴロゴロという音響も発生する。このエネルギーは積乱雲上昇気流の一部であり、単純に言えば太陽エネルギーである。

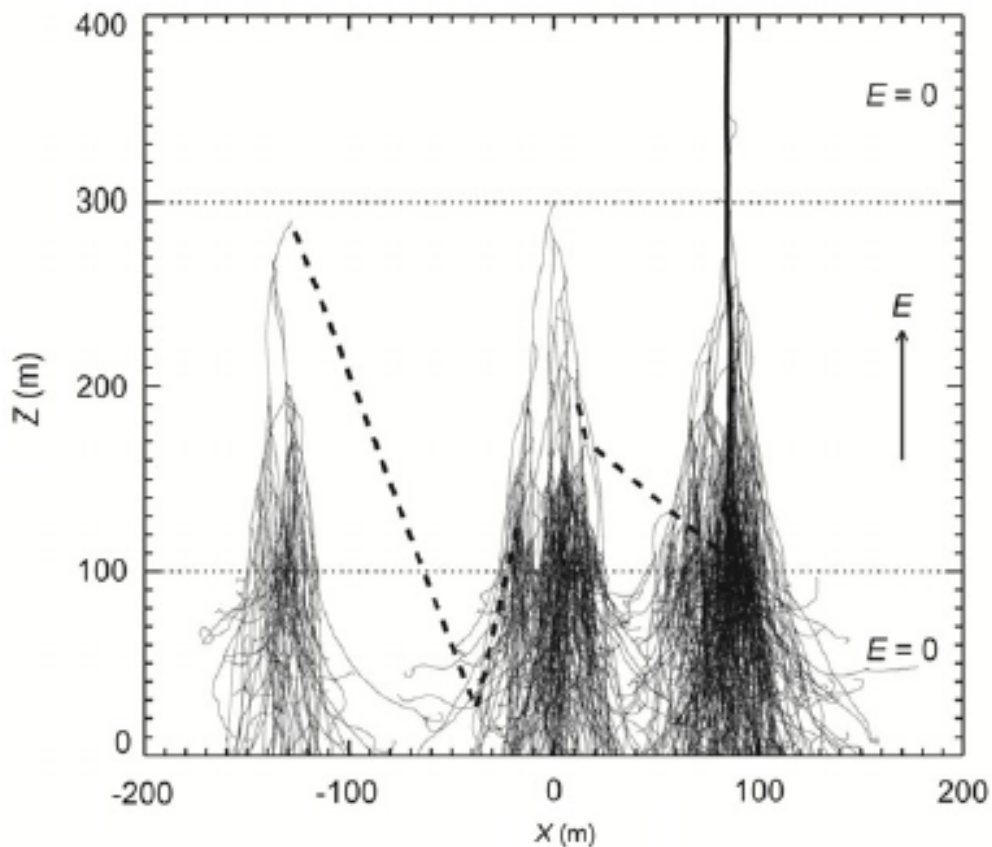
雪崩増幅のシミュレーション

電場の方向に沿って荷電粒子が運動すれば加速されるが、空気中では気体の分子が一杯あるので、それらと衝突してすぐにエネルギーを失う（加速器ではよい真空状態にしてある）。しかし十分に電場が強いと衝突までの間に十分加速され、エネルギーを失いながらもどんどん加速される。これは逃散（ランナウェイ）電子とよばれる。原子をイオン化して自由な電子を新たに作り、それらがまた同じことを繰り返して、倍々ゲームで自由電子が増殖する。雪崩増幅（アヴァランシュ）とよばれる現象である。少数の逃散電子が種となって多数の電子に増幅する。

図 3 はこの雪崩増幅をコンピュータ・シミュレーションした例である。縦軸に見る様に地上からの高さで 100m から 300m の間に 1MV/m の電場がある。

図 3 :

空気中の電場の中での逃散電子による雪崩的増殖のコンピュータ・シミュレーション(図出所：J. Dwyer and M. Uman, Physics Report, 534(2014), 147)



この図3で高さ300mの真ん中あたりから逃散電子が加速されて下向きに走り出し、次々とシャワー状に逃散電子が増幅していく様子が描かれている。たまに点線で示した様なX線が発生する。X線は上下左右どの方向にもできるが、X線は衝突までに走る距離が長いので高飛びして新たなシャワーを発生させる。この図3では左右に新たなシャワーを作る様子が見てとれる。右側のシャワーでは陽電子が上向きに加速されていく様子が太線で示されている。

条件が重なると高エネルギー粒子発生

制動放射でガンマ線をだす高エネルギー電子まで加速するには10MeV以上まで加速せねばならない。電離でのエネルギー損失を乗り越えてここまで加速するには30MV/mもの電場が必要だが滅多に起こらない。しかし宇宙線の大気中での素粒子反応で二次的に生じた数MeVの電子が雷電場によって雪崩増幅で多数の電子に増幅され十分な強さのガンマ線が発生するのである。

落雷前の雷雲中に強い電場が出来ていて、その場所で偶然に宇宙線により逃

散電子の種が供給されて雪崩増幅がおこり、前回述べた様な高エネルギー現象が起こるのである。落雷が起こらなければ、この天然の加速器は10分ぐらいの長い時間続く。

落雷とは大電流が流れて電場が消滅することだから、この天然の加速器も消滅する。最近、冒頭に記した京大などの観測チームは、その後、この「落雷による加速中断」も確認した様である。落雷による長波長電波のシグナルとの時間の相関をみて確かめたという。

このグループの研究の詳しい情報は次のHPで見ることができる。

Thundercloud project <https://thdr.info>

専門的な論文もあるが、高校生に話したパワーポイントなどもある。