

《電磁波火球》

非常に明るい火球が大気に入射することに伴う様々な現象の中で、火球の飛来と同時に聞こえる音響現象は特異なものである。この音響現象と、火球が飛来して数十秒～数分後に観測者に達する、普通の音波の伝播速度で伝えられる音とは何等、共通点はない。多くの目撃者の談によると、非常に明るい火球が飛来した際にヒューヒューまたはサラサラという音が聞こえ、音が火球からではなしに目撃者の周囲の物体から発しているように思われることがしばしばあった。ドラベルタの提案によって、このような火球のことを電磁波火球(электрофонные болиды)と呼んでいる。

明るい火球の出現に伴って異常な音が聞こえることに初めて注意を向けたのはフラジーンで1794年のことであった。その後、音波の伝播速度は光よりもずっと小さく、従って、火球からの音が火球の飛行と同時に聞かれることなどあり得ないとして、学者達の大半が火球の電磁波音現象を否定して来た。多数の目撃者による火球の電磁波音現象の報告を学者達は、明るい火球の飛来から、音が物体の飛来に余り遅れないで聞こえる花火の打ち上げや砲弾の飛来等の際の音を連想したことによる心理的な影響と解釈していた。これらの学者達の考えでは、目撃者達が実際には聞こえなかった音を聞こえたと思込んだのである。従って、これらの研究者達の著作、キルクウッド、『流星天文学』(1867年)、ファーリングトン、『隕石』(1915年)、オリビエ、『流星』(1925年)には、彼等が電磁波音現象についての報告を知っていたことは間違いないにもかかわらず、電磁波音火球については触れることさえしていないのである。

他の研究者は、例えば、ワイリーのように、明るい火球が出現した時に異常な音響現象が観測されたこと迄、黙殺することはしないで、純粋に《精神生理学》的解釈を行っている。ソビエトで長居間、この立場を取ったのがレビンである。

以下で示すように、火球の電磁波音現象の《精神生理学》的解釈は何等の根拠もなく、何百もの観測に矛盾するものである。目撃者の中には専門の天文学者もおり、火球の飛行自体が観測者に心理的な影響を全く与えないような条件で観測された例もある。即ち、室内にいたり、視界が妨げられたりして火球が見えないような状況にあって、音で初めて火球に気付いたというものである。

電磁波音火球の本格的な研究はアスタポビッチに始まる。1925年に明るい電磁波音火球を目撃したことが17歳の青年に極めて深い印象となって残ったのである。これがきっかけとなって、彼は文献を調査し、同様な現象の観測例を多数見出したのである。1929年にアスタポビッチはおよそ40個の電磁波音火球を収録した初めての目録を作成した。1951年に彼は163個の電磁波音火球を収録した、更に詳しい目録を編集・発表している。これには最初の目録の電磁波音火球も収録されており、更に、585年迄さかのぼって歴史書に登場する音の記録を収集している。ソビエト科学アカデミー隕石委員会の資料に基づき、更に63個の電磁波音火球の観測が3年後に、同じ『Метеоритика』(隕石学)誌上にこの目録の補遺として掲載された。電磁波音火球の3番目の目録はアメリカのロミグとラマーによるもので、41個が収録されている。以上3編の目録に1962年迄に観測された総計267個の電磁波音火球が収録されている。1987年に、本書の筆者とグレベンニコフ、ラプンスキーによって、最近20～30年のものばかりでなしに、ずっと以前の観測で見落とされていたものも含め、総数350件の観測を収録した4番目の目録が作成された。これも含めると、電磁波音火球の観測総数は約600件になる。

目撃者の多くは火球の飛来と同時に聞かれた音のことを《スー音》または《シュー音》のように表現している〔訳註：スー音；с、зの音、シュー音；ж、ч、ш、щの音〕。例えば、いくつかの例を挙げると：「物体がもの凄い勢いで運動する際の、ヒューヒューという音」(ルブヌイのグラスマン)、「ヒューヒュー、シューシューというざわめきが聞こえた」(スタプロボリのイワノフ)、「大きな蛇がシューシューというような音が聞こえた」(トルキスタンのカシュブーリン)、「燃えている物を水の中に入れる時のジュッという音である」(天文学者、ゼリマノフ)、「音の高さが速まりながら、高くなり(ウウウ!)、突然止む」(アシュハバード州の音楽家、ペイチ)、「木の葉に砂を撒いたような音である」

(インドのモハメッド・ハン教授)、「飛行機のエンジンが止まる時のヒューという音に似ている」(アメリカ、テキサス州の目撃者) 以上、引用した比喩によって電磁波音火球の音の特徴が明瞭に表されている。

以下に、《精神生理学》仮説に明らかに反する証言をいくつか引用する。

「我々の背後で、花火を打ち上げる時の音に似た、《トシュシュシューフ!》という音が聞こえ、一瞬、地面が明るくなった。私とプロヒンが急いで振り向くと、火球が消えた跡の痕が見えた。」(1925年8月20日、アスタポビッチ)。

「タイガを吹き渡る嵐のうなりのような大きな音が聞こえた。振り向くと、その音から1~2秒後に、極めて明るい光る物体が見えた」(1927年5月27日、イルクーツク州ベルフネウディンスク付近のハスルタ、コゾザエフ)。

「突然、電線がショートしたか、または、マグネシウムのフラッシュを焼いたかのような激しい爆発音が鳴り響いた。私は電柱が焼失したのかと思ったが、パチパチという音は続き、電燈は消えたままだった。電燈がついた時、私は街路の真中に飛び出した。すると、隕石の落下するのが見えた」(1937年夏、アシュハバード、ロマナド)。

「火球の出現に先立って音が聞こえた。音で気付いて、音のした方向を見ると、光る物体が近づいて来るように見えた」(1941年12月17日、カスピ海の汽船上で当時、モスクワ大学の大学院生であったゼリマノフの目撃談)。

以上の目撃談はすべてアスタポビッチの目録からの引用である。目撃者の氏名が明らかにされていないが、ロミグとラマーの目録にも同種の目撃談が収録されている：「シューシューという音が聞こえたので、何の音だろうと思って顔を上げると、火球が飛んでいた」(1928年6月23日、アメリカ、テキサス州の目撃者)、「家の中に居る時、飛行機が急旋回するような音が聞こえた。そこで、ドアの方に向かうと、南東の方向に流星が見られた」(1933年8月8日、アメリカ、ネブラスカ隕石落下の目撃談)、「ヒューヒューいう音に気付いて、上を見た途端に流星が飛ぶのが見えた」(1932年8月10日のアルチ隕石の目撃者2、3名の証言)、「バスケットボールをしていると、特異なヒューヒュー或いはシューシューという音がした。見上げると、火の玉が東の方へ飛んで行くのが見えた」(1948年2月18日、アメリカ、カンザス州、ノルトン・カウチ隕石の落下を目撃した少年の談)。

このような例はまだまだたくさん挙げることが出来るが、もう1つ、オムスク州のイシクリ町に住んでいた生物学者のグレベンニコフが筆者に教えてくれた目撃例を挙げるに止めておく。事件が起きたのは1958~1960年の或る冬の夕方遅くであった(目撃者は正確な日時を覚えていない)。グレベンニコフの記すところによると、「頭の上から、ちょっと金属的な、布をほころばせたり裂いたりする時の音に極めて似通ったビリビリという音が聞こえた。はっとして頭を上げると、天頂付近を明るい白色の流星が急速に北西から南東に向けて飛行していた」。

以上、引用した、また、目録中に掲げられた多くの同様の報告を《精神生理学》仮説によって説明できないことは明らかである。多くの場合、音は火球の目撃に先行するばかりでなく、目撃者が天空を飛行する物体に注意を向ける元にさえなっているのである。

このことを最も明確に示しているのは、1978年4月7日にシドニー市を含む人口が多い、オーストラリアのニュー・サウス・ウェルス州上空に出現した明るい電磁波音火球の目撃例である。

この火球は早朝に出現し、光度は満月のおよそ15倍の-1.6等級であった。ニュー・サウス・ウェルス州の東海岸地帯で数百人が目撃している。およそ、その3分の1が、火球の飛行と同時に異常な音を聞いたことを報告している。ケイはこの異常音が聞かれたという報告をすべて収集し、分析している。彼は火球の目撃者33人を調査しているが、その内の10人は異常音を聞いていた。また、その10人の中で3人は、まず音を聞き、だからこそ、火球に気付いたのだとはっきりと述べている。ケイの推定によると、流星体が放出したエネルギーは、最大光輝の時に $4 \times 10^{11} \text{w}$ である。その内、放射エネルギーとなったのは 10^{10}w で、即ち、流星体の総エネルギーの1%以下に過ぎない。

電磁波音現象が極めて顕著であったので、ケイは火球の飛行と同時に音が聞こえる物理的な原因について考察し、いくつかの実験を提唱している。

このような異常音が何故生じるのかについては、既に1930年代にも研究がなされている。音の発生機構についての仮説は次の2つの型に分類される。

1. 電磁波のエネルギーが無線周波或いはそれよりも低い周波数に変換され、続いて整流され、目撃者の直近で音に変換されるという機構。

2. 静電気による機構。即ち、近くの物体に誘導電荷が生じ、その後、電荷が溜っていく際に、音響現象を伴うのである。

恐らく、1965年にイワノフとメドベデフが行ったのものが、後者の機構についての理論的な分析の最初であろう。彼等は、流星体を取り巻く衝撃波の背後の或る領域では、電離が起こった領域から電場が排除されるようになり、その際に、この領域は地球の電場と反対向きの双極子モーメントを持つようになることを示した。誘導される電位は、大きな流星体が大気に鉛直に突入する際には数百ボルトになることもある。しかし、静電的な機構は目撃者の証言と一致しない。彼等は明確に、音は周囲の物体から発せられたのではなく、上から、火球から聞こえたとして述べているのである（前述のアスタポビッチ、コゾザエフ、ゼリマノフ、グレベンニコフの記録を参照）。

残るは、火球による磁気の変動が光速で、即ち、電磁波として下に伝播されて、音に変換されると考えることである。このことが正に可能であることを示したのがケイの実験である。

ケイは無音室に被験者を座らせ、その中の電場(130V/m)を数千ヘルツという可聴周波数で変動させたのである。すると、被験者には音が聞こえた！ その際、髪が長い人や金属製の眼鏡フレームを使っている人には音が良く聞こえた。髪や眼鏡のフレームは同じく耳鼓と共に電磁波の振動の検波器として働き、電磁波を音波に変換したのである。

有名な天文学者で惑星の研究者であるクサンオマルチは、強力な発信源からの電波をバラボラ・アンテナで受信している際に、低く鈍い音がはっきり聞こえると、筆者に語っている。

このように、電波が音波に変換される可能性がある。しかし、それは一体どうやって生じるのであろう？ 何が発信機となして働いているのであろう？

大きな流星体が地球大気に侵入すると、明るい火球として観測される。良く知られているように、火球の運動に伴って跡にイオン・電子痕が形成され、痕は次第に拡散され、膨張していく。明るい流星や火球で形成される痕を常に過飽和痕(オーバー・デンス)とみなし、實際上、キロ・ヘルツ帯だけでなく、メガ・ヘルツ帯の電波に対しても不透明であるとして扱っている。

流星痕には乱流が発生する。乱流の渦巻きは、或る条件下で地球磁場の磁力線を巻き込むことがあり、その際には、火球の痕の内部の磁力線密度は著しく増大する。しばらくすると、この磁場は崩壊するが、その際、周囲の空間にエネルギーを放射する。その中には当然、電波も含まれている。

ケイの考えは極めて興味深いが、厳密な理論的根拠を持っていない。本書の著者は理論的な説明に成功した。

まず、そのような機構が作用するためには、流星痕の伝導率が或る基準値を越えなければならないことが明らかにされた。このことから、アスタポビッチが見出した、「-9等級異常の極めて明るい火球のみに電磁波音現象が観察される」という事実を説明することが出来る。

流星痕の中で磁場が生成される領域が数百メートル以下の長さしかないので、流星痕における磁場の生成と崩壊の固有時間は、それぞれ、 10^{-3} 秒、 10^{-2} 秒と、ごく短いことが計算によって明らかにされた。磁場が崩壊する際に、エネルギーの大半はジュール熱に変化する。わずか0.1%だけが電波に変えられる。火球からおおよそ100kmも離れた観察者の耳に聞こえるほどの音響作用を及ぼすことが、一体このエネルギーで可能であろうか？

計算によると、人間の耳の整流器としての効率が極めて低いことを考慮したとしても、十分、聞こえ得るのである。

実際、もっと効率の良い、電波受信機の効率が20%であり、大抵のものはもっと効率が悪い。しかし、効率がわずか0.1%であっても、サラサラ或いはヒューヒューというような

音を聞くのには十分なのである。

残念ながら、異常音は前述の普通の音と共に発生するので、録音機による記録はなされていない。電磁波音現象はごく、ごく稀な現象であるので、電磁波音火球の出現に備えて録音することなどまるで困難である。実際に、流星や火球自体からの電波が受信されたという報告がある。1940年代にアスタポビッチはアシュハバードで流星自体からの電波放射の観測を繰り返し行い、好結果を収めている。同じ頃、北氷洋を孝行していたソビエトの船舶の無線技師、クリュストフは、明るい流星の出現時刻と無線の受信機から雑音が聞こえる時とが一致していることが何度もあったことに気付いている。一方、アメリカの流星観測の専門家、ホーキンスは何も得ていない。実際、ホーキンスの観測した流星は0等級よりも暗く、クリュストフが捕らえた流星はそれより6~40倍も明るいのである。

1960年代にも同様な観測が試みられたが、多数の放送局やアマチュア無線局が設置されたことによる甚だしい妨害に妨げられてしまった。

しかし、明るい流星が地上の物体に電磁気的な影響を与えているという客観的な事実は多数存在している。シホテ・アリン隕石が飛来した際に、電話線を修理していた機械技師のエフティーフは、線が接続されていないにもかかわらず、電撃を感じた。1984年2月26日のチュリム火球の出現の際には、西部シベリアの各地で、電球が焼け切れたり、テレビのブラウン管に障害が出たり、昼光電球の光電管が使えなくなるという事件が起きた。異常のような事件はいずれも、火球による電磁場が強力であることを証明している。

流星や火球が地球大気中を飛行する際に生じる電磁気的な現象の研究は始まったばかりである。この研究が極めて興味深いものであることは確かである。

《電磁波現象》

火球の飛来に伴う奇妙な自然現象の1つに「電磁音現象」がある。1925年8月20日18時33分(UT)に南部ウクライナの上空にキリン座を輻射点とする明るい火球が出現した。目撃者の人達が、《ツシュシュシューオーッ》或いは《トシュシュシューイーオーッ》というような音、また、薄暮の明るい時間であったにもかかわらず地面が明るく照らされたのに気付いて振り向くと、消滅しかけた火球が見られたのである。また、火球の跡には濃い痕が18分も残された。この音は、火球の経路から247kmも離れたニコラエフ、エラン他の諸都市でも聞かれている。まず、最初に音が聞かれ、その後様々な地点で多数の人達が火球を見ているのだから、心理的な錯覚が重なったものとは考えられない。他の火球の観測を調べて、筆者(アスタポビッチ)は同様な音が聞かれている火球の観測を数十例、見出した。それらの例については1929年に報告しているが、多くの場合、思い違いとみなされていたものである。しかし、このように火球の出現と同時に音が聞かれることなど、音より光の方が速いことから、あり得ないこととして、雑誌の編集者が報告の掲載を拒んだほどであった。

しかし、文献や古記録中の記載を調べると、天文学の歴史上、全世紀にわたってこのような《異常音》の観測が残されているのである。我々が見出したものの中で最も古い記録は馬端臨の「文献通考」にある、「火球は鶴の群れが飛ぶような音をたてながら飛来し、しばらく後に、衝突が繰り返り起こったような音が聞こえてきた」という、中国のイ・ハイに817年9月に極めて明るい火球が出現した時のものである。後者は、普通に聞かれる衝撃波によるものであり、しばしば記録されているものである。通常、《異常音》を伴う流星は明るいので、2種類のそれぞれ異なる成因をもつ音が聞こえることになる。中国ではこの《異常音》は、他に「絹のふれあう音」や「亜麻布が風に揺らぐ音」に例えられているが、ソビエトの古記録では、西欧諸国の年代記の記述の仕方と同様である。当時は、偏見がまだなかったため、様々な時代の様々な土地の様々な(聞いた)通りのことを記録している。一方では、アメリカの大学教授は、「流星の出現と同時に遠方で《ヒューヒュー》、《シューシュー》という音が聞こえるようなことは物理的にあり得ない」として、全く無視している。従って、キルクウッドの「流星天文学」、ファリングトンの「隕石」、オリビエの「流星」のいずれにも、彼等が知り得なかったはずはないにもかかわらず、《異常音》については何も触れられていない。音響学の大家フラジンは1793年にこの現象を学問の対象としたのを初めとして、ストイコビッチ(1807年)やムーヒン(1819年)も研究している。ホッフはフラジンの火球カタログ作成を引き継ぎ、1835年に「ヒューヒューまたはシューシューというような音が通常、流星に伴う」と、述べている。ブレーデは、このような音の報告が疑いを持って受け止められることに憤慨している(1804年)。ケムツは、1836年に、「発光現象が続いている間に破裂音が聞かれるか注意すべきである」と、述べている。ガレは1873年6月17日の火球を調査し、様々な地点の20人もの目撃例について、「このようなことは、とてもありそうもないことだ」と、述べている。メイヤーも1902年11月16日に出現した火球の資料を収集した中で、このような《シューシュー》音について「しかし、全くあり得ないことである」という注釈を付けている。デニングも、音が火球の飛来と同時に、或いは、先立って聞こえるような観測例を多数、知っていたにもかかわらず、「音は光よりも遅い」として、あり得ないこととしている。ワイスは何十もの火球について研究し、説明することは出来ないが、そのような現象が存在することを認めている。レビン等の学者達は、説明出来ないことを理由に、このような現象を否定しているが、ここでは、目撃者や専門家による実例に目を向けることにする。ベルバート(1913年)は隕石総覧の中で、1910年7月12日の火球に伴った《シューシュー、サラサラいう音》の速度が音の百倍も大きかったことを報告している。シャインは「1920年11月29日に、火球の飛来に伴って《ヒューヒューまたはシューシューいう音》が聞かれたことを記している。クリックは、数千件の火球の観測例を収集して、2つの種類の音を区別すべきであると指摘している。既に、フェディンスキーは1931年に発光現象と同時にこのような特異な音が聞こえる可能性を認めている。シモンは1933年に行ったアンケートの中に、「シューシューまた

はパチパチという音が火球と同時に聞こえたか否か」という問いを加えている。このような音は電磁的な成因を持つという筆者の仮説を裏付けるような実例が多く蓄積されたことにより、1940年にドラベルトはこのような火球のことを《電磁波流星》と名付けている。ワイリーは、ナインジャー同様、火球に伴う普通の音が経路の末端に近い所でしか聞かれないのに対して、《ヒューヒューまたシューシューという音》は、ほとんどのすべての場合、明るい火球に伴って240kmにも及ぶ驚くほど遠方から聞かれており、その音はのろしや花火の打ち上げ音の聞き違いであるとしている。インドのモハメッド・ハン教授は、筆者同様、そのような音を自分自身でも、他の目撃者と同時に聞いている。

《電磁波火球》

1951年にソビエトで163個の電磁波火球を収録したカタログが発表された。電磁波音は次のように表現されている：鳥の群れの羽音(鳴き声)、花火の打ち上げ音、モーターのブラッシュがパチパチいう音、スイッチのスパーク、木の葉に砂粒がサラサラこぼれる音、風にそよぐ小枝のざわめき、電気溶接のパチパチいう音、炉を吹くふいごの音、薪の束が燃えてシューシューいう音、織物がガサガサいう音、風のザワザワまたゴーゴーいう音、風に鳴る炎の音、赤熱した鉄を水に入れた時の音。このような音は、より注意深く観察していた人が指摘しているように、火球よりはむしろ周囲の地上の物体から発せられたものである。例えば、1887年8月30日のオハンスク隕石の落下の際には、火球が飛行している間に、開かれた窓際に置かれた花がガサガサ音を立てており、1904年5月22日のテレウトスク湖隕石の落下の際には、出窓の敷居に置かれた花の葉が音を立てたことが記録されている。モハメッド・ハン教授は、1936年10月13日の火球をハイデラバードで観測した際に、まるでマンゴーの樹の葉が静電気を持ったかのような現象に気付いている。火球が消滅した直後に、小さいが、明瞭な《ププフ》という、火葉の軽い破裂音に似た音が聞かれていることも何度かある。明るい火球ほど、音の強度は大きくなる。例えば、1908年6月30日にツングース隕石が飛来した際には、カンスクで「驚いた鳥が飛び立つ羽音に似たざわめきが聞こえ、光る丸い玉(火球)が出現した」という記録がある。また、1905年12月12日にモンゴルのアラシャンスクに隕石が落下した際には、「最初、耳が鳴るような鋭い金切り声のようなものが聞こえてきたので、それから、上を向くと、北の空を東から西の地平線の彼方に向けて急速に火の玉が飛んで行くのが見えた」のである。1706年12月1日に大火球が出現した際には、トボリスクで《歯ぎしり》のような音が火球と同時に聞かれている。電磁波現象は、近年の隕石落下では、殆どすべての場合に記録されている：1929年3月1日のフメレフカ隕石、1932年5月26日のクズネツォボ隕石、1933年12月26日のピェルボマイスク隕石、1936年5月29日のイチユカラ隕石、1949年6月11日のクナシャク隕石、その他多数である。

これら163個の電磁波火球の音はありとあらゆる職業の人によって観察されているが、一様に、《シューシューまたはヒューヒューという音》であると表現されている。音は、火球と同時に聞かれている場合もあるが、光度が極大となるよりも1、2秒前、即ち、光度が増大する時に聞かれている場合もある。電磁波現象は、北半球でも南半球でも、熱帯でも極圏でも、陸地でも海でも、山地でも平地でも、また、1年の内のあらゆる日時に観測されている。火球の光度は-6等級以上であり、光度の記録のある46個の電磁波火球の平均光度は-16等級という超火球クラスである。100~200kmの距離において、火球の光度が-6、-12、-18等級のとき、音の強度は、それぞれ20、40、60ホンである。もっと明るい火球では、《ギリギリ、キーキー、ブンブン》と、聞こえ方が変わって行く。多くの場合、電磁波火球の経路は勾配が $h_R=31^\circ$ と、なだらかで、消滅点の高度も $H_z=20\sim40$ kmで、平均は32kmである。消滅点高度が55km以上であるのは、わずか16%で、76%が35km以下である。音は、火球の経路から10~420kmの範囲で聞かれ、通常、50~200kmである(末端からの距離ではない)。火球の経路を地表に投影したものから垂直な方向で聞かれていることが多く、経路の延長上や逆延長上は比較的少ない。地磁気による磁界の向きとの関係についてはまだ研究されていない。また、これらの火球の速度は16~74km/sである。痕は電離

痕(ガス痕)が一般的であるが、塵芥痕も8例あった。速度の小さい火球は火の粉を撒き散らしながら飛来し、色との関係は余り見られない。しかし、60%が白-淡青色、22%が橙-赤色であった。速度の大きい火球は《チュシュシュ》というシュー音〔訳註：*、*、*、*の音〕や《ププフ》といった破裂音であり、遅い火球は《ススス》という無声音のようである。音は、石質隕石の場合にも、隕鉄の場合にも聞かれている。電磁波火球の半分は南、恐らく、黄道帯から飛来している。火球が飛行している途中で音の変化が観察された例もある：ヒューヒューという音からシューシューという音へ、音の調子が高くなる、末端で「燃え盛る」になる、といった例である。音が最も強くなるのは、火球にまだ気付いていない、光度が最も急激に増加する時なので、音が火球の出現する前に聞かれるような印象を受けるが、火球の最大光度の前と言うべきである。

《オーロラや雷の放電の音との類似性》

火球による電磁波現象を「オーロラの音」と呼ばれている現象と比較しないわけにはいかない。この現象は長い間、論議的的となっていたが、現在では、録音もされ、存在が確認されている。「オーロラの音」とは、オーロラの光が極めて強い時、特に、形が急速に変化している時に聞こえる、特異な、電磁波火球で聞かれたという音と同様のサラサラ・シューシューまたはヒューヒューといった音のことである。ロシアの海軍大将、ブランゲリは、前世紀の初頭、北氷洋の海岸で、「オーロラが互いに重なり合い、最も明るくなった時に、ふいごを服のような微かな音が聞こえた」ことを記している。1919年にツルチノビッチが、『オーロラの音』の発見はロシアの観測者によるものであることを指摘している。外国の研究者の「オーロラの音」に対する見方は画一的で、「見掛けだけのものでなければ、そのような現象はあり得ない」としていた。大グメリン〔訳註：ヨハン・グメリン、1709～1755年、シベリアについての博物学者・探検家、甥のサムエル・グメリンも探検家である〕は、エニセイスクの住民の話として、「オーロラから《花火》に似たざわめきが聞こえる。犬どもはそれを聞いて、恐れにかられて地に伏せる」と書いている。ケムツは、『気象学教程』の中で、「この音は松明の火から生じるものである」と述べている。ハンステーンは、「松明の火が燃え盛っている時のものである」としている。オジリビによると、『目隠しをした観測者が《ざわめき》が最も大きくなったと判断した時と、オーロラが燃え上がった時とは一致した」。カナダの天体物理観測所は1933年、特別のアンケート調査を行った。《ざわめき》を聞いたという144人の内、106人から回答が得られた：ヒューヒューとかパチパチといった音が聞かれ、10例についてはオーロラの接地部分から音が発していたとされていた。チャントは、この音を地表付近での静電気の放電によるものと考えた。ヘンダーソンも電波観測に基づいて童謡の結論に達している。ファアスは、1926年10月15日にオーロラの音をガッチナで詳細に記録している：オーロラは北半球全体を包み込む《記録的》なもので、オーロラの音は蚊の羽音のように、誰しもが気付くほど《極めて容易》に聞き取ることが出来た。全く同時刻に、ノルウェーのイェリストループもこの《微かなヒューヒュー》という音を聞いている。音は光の脈動にきちんと同調していた。ウスチ・ツイリムでは、天頂でオーロラのコロナがほとんど分からないくらいの速さで脈動していた。ベルミでは、デミニエフによって地磁気記録計が $2^{\circ}26'$ 振れたことが記録されている。ステルメルは写真測量によってオーロラの高度が90km以上であることを明らかにしている。このことから、音はオーロラによって帯電した地表の物体が引き起こす静電気的な現象であると考えられる。1928年の冬には、レニングラード州でオーロラの音が大勢の人に聞かれている。1932年以前に、舵手のハリンがバレンツ海で、1937年初頭にはスタニコビッチがカレリヤデソレゾレ、オーロラの音を聞いている。1939年には、チャップマンが『低空のオーロラと音』の中で音が聞かれた例を39例挙げている。それ以降、オーロラの音は科学者のグループ(ステルメルと共同研究者)によって観測され、機器によって記録されるようになった。

《雷音現象との類似》

近くで稲妻放電があった時には、光とともに乾いた、絹織物を裂くようなパチパチという短い音が聞かれることがある。それに続いて普通の落雷が起こる。筆者は、この音響現象と火球やオーロラの音との類似性について調べていくうちに、既に、1863年にウィリアム・トムソンが「雷道また落雷地点からかなり遠く離れた場所でも、稲妻と同時に音が聞こえる」、1893年にはムンローが「このような音は、火花が飛ぶ時とは違って、コンデンサーの放電の際に生じる」と記述しているのを見出した。ケイフは1934年に気象学の文献に《スー音》が聞こえたという記述が大量にあることを報告している：赤熱した鉄塊を水の中に入れる時のジュッという音、織物が裂ける時の音、突風の音、鞭のヒューヒュー鳴る音、電線がショートした時のパチパチいう音に似ている。稲妻と同時に音が聞こえるばかりでなしに、稲妻よりわずかに先行することもある。これは、稲妻が形成される時の一次分岐放電(先駆)となっているためである。彼はこの分岐を周囲で「唯一の」の誘導電荷によるものと考えている。野原で、対向放電の側に当たるが、「直近の樹木からヒューヒュー音がした」ことがあった。このような現象のことを雷音現象(бронтофонное явление)と呼んでいる。1926年から1936年にかけて、ケンブリッジの太陽物理観測所でウォルトマンは、写真装置付きの電位計を用いて、6000回にわたり、稲妻放電の際の地球電場の強度測定を行った。通常の地電位の勾配は100V/mとなっているのに対して、放電の際における電圧の跳躍は正にも負にも66000V/mに達していることが分かった。繰り返し放電が起こる場合には、地電位は2、3桁変化することもある。《先駆放電》が主放電の前に起こり、その際の電場の変化は10kV/m未満である。平均的な勾配の場合には、負放電は15km、正放電は15~20kmになる。垂直放電は地表に達しないで、距離が近い場合には1桁の電圧の跳躍を起こすが、距離が大きくなると違ってくる。距離が2~3km、4~5km、10km、15kmのとき、電圧の跳躍がそれぞれ20、10、3、1~2kV/mを越えることは稀である。正放電は大地に達しないで、負電荷の高度を大きくするのである。

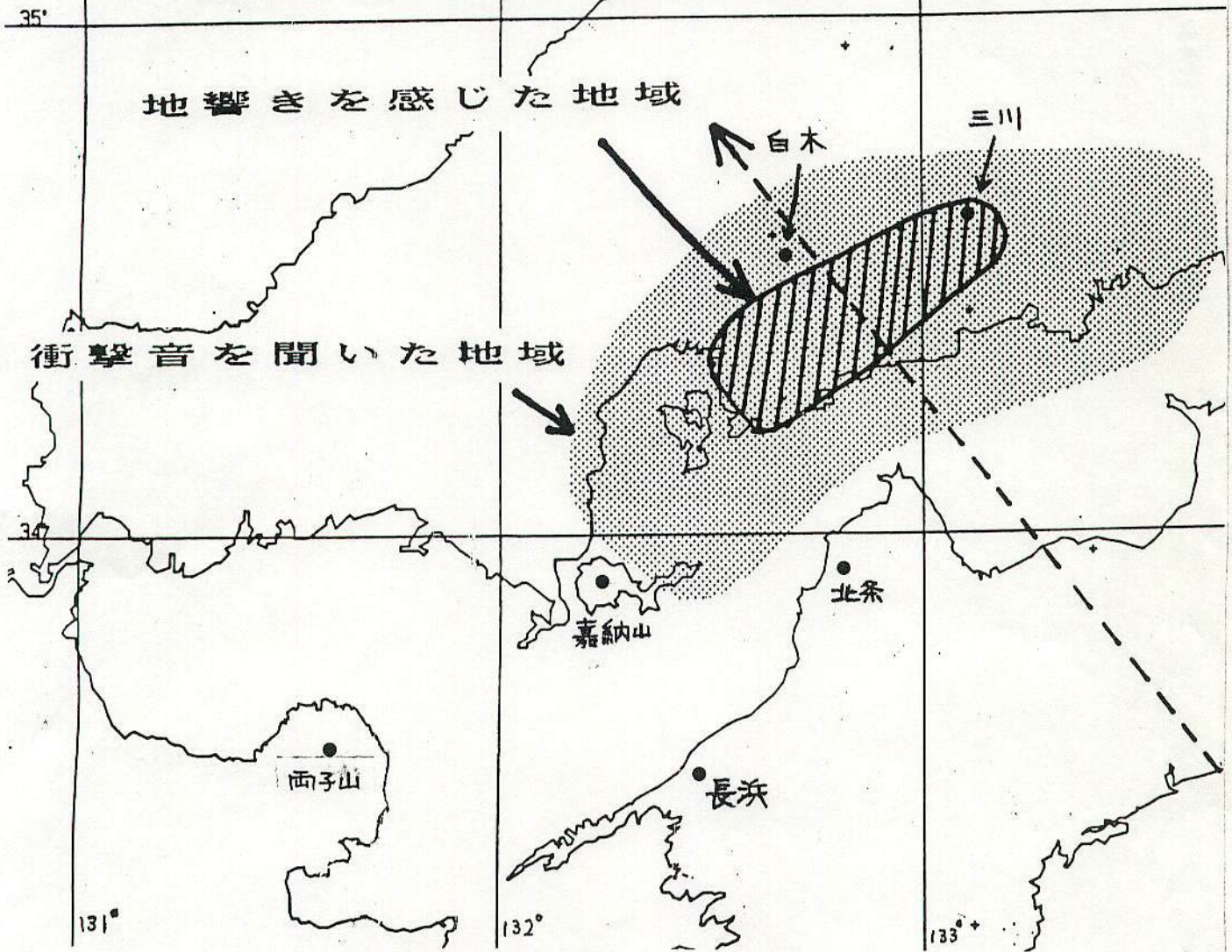
《観測データの総括》

火球やオーロラまた雷に伴う電磁波的現象は音の大きさのレベルとして客観的なものとして捕らえられていない。高度 $H=5\text{km}$ の稲妻放電の電荷が20C(クーロン)であるので、火球が飛来(経路200~500km)することによって、流星の物理理論から推定して、 $10^4\sim 10^5\text{C}$ 程度の、恐らく、正電荷が発生し、それに向かって大地から負電荷が流れ込むと考えられる。従って、火球の飛来によって、地電位の瞬間的な跳躍、電荷の移動による発光、音、オゾン生成、通信線の感応、磁針の振れ、電波障害といった現象を伴うはずである。地球の上層大気は、大地に対してこれも正の約 $5.4\times 10^5\text{C}$ の静電荷を持っている。しかし、ずっと以前より、オーロラによって 10^6A (アンペア)以上の電流が作られていることが知られている。大気と大地の間に1360Aの垂直電流が流れ続けるためには、 $2.9\times 10^5\text{kW}$ の電力が必要である。これは、1日当たりわずか10tの流星が $v=50\text{km/s}$ の速度で運動し、そのエネルギーの0.1%が与えられれば、容易に埋め合わせることが出来る。エッブルトン等の電離層のE層は主として流星によって絶え間なく更新されているという説に近い。恐らく、流星が大地に対して正の電荷を大気に与えて、一定に保持しているのであろう。

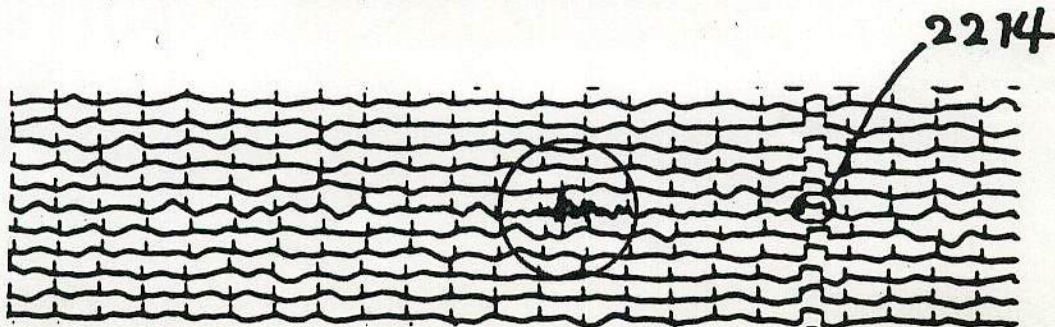
Station	Time	Latitude	Longitude	Height
Shiraki	22 ^h 10 ^m 42 ^s	34°.5322	132°.6775	285 m
Mikawa	11 42	34 .6111	133 .1069	320
HoJo	12 58	33 .9300	132 .8153	360
Kanozan	13 54	33 .9117	132 .2466	680
Nagahama	15 7	33 .5333	132 .4685	350
Futagoyama	17 12	33 .5794	131 .6042	720

320m/s
 20°程度
 (高空では)
 左方向の速度は不明。
 6点観測では
 軌道計算可能

1987年9月11日 22時10分ごろの火球による音



嘉納山の地震記録



Sept. 11, 1987

$\lambda = 133^{\circ}.000E$... 133° あたり

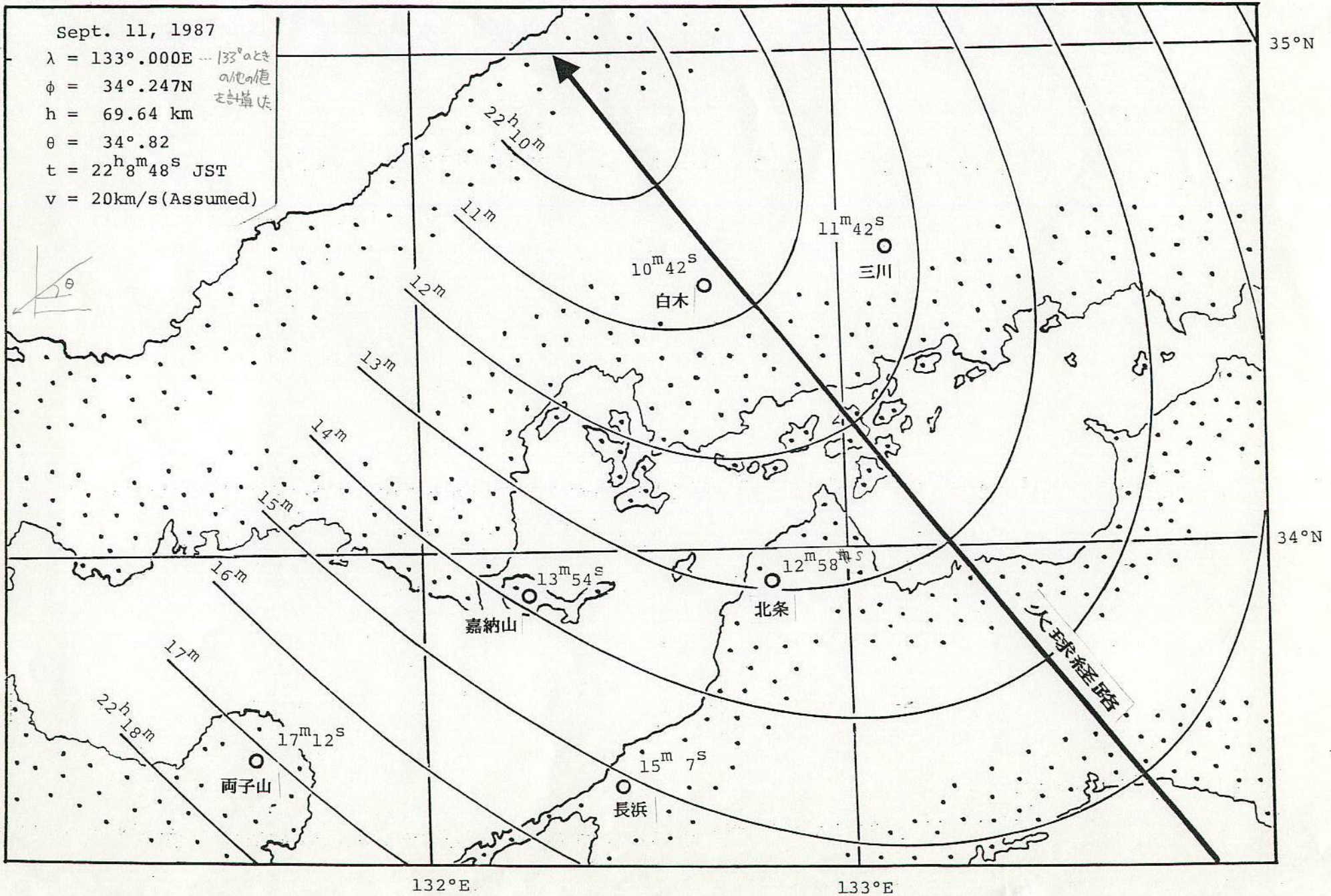
$\phi = 34^{\circ}.247N$... 方位の値

$h = 69.64$ km ... 高度

$\theta = 34^{\circ}.82$

$t = 22^h 8^m 48^s$ JST

$v = 20$ km/s (Assumed)



From 50K

45 MSS

54th M.S.S., 1990. 4/15 配布

Anomalous Sounds from the Entry of Meteor Fireballs

Colin S. L. Keay

Sometimes very bright meteors known as fireballs are heard before they are seen. This apparent violation of the normal mechanisms of acoustic propagation has been a long-standing problem in meteoritics. According to Romig and Lamar (1), the problem was recognized almost 200 years ago by Sir Charles Blagden (2), Secretary of the Royal Society of London. He collected reports of a large fireball and was perplexed by the simultane-

effects produced by infalling meteorites has been published by LaPaz (3), and many more recent instances have been cataloged by Romig and Lamar (4). Psychological explanations of the sounds were questioned long ago by Udden (5), whose detailed study of observations of the Texas fireball of October 1917 led him to ask if the sounds could be due to some form of electric energy. In his text on meteoritics, Nininger (6) drew atten-

tion that the sounds are produced in the immediate vicinity of the observer by matter associated with the meteor and traveling at a similar speed. Much more defensible is the suggestion by Hughes (9) that "Considerable radiation must be produced by the fireball in regions of the electromagnetic spectrum other than the visual and this could provide a possible explanation." Such radiation has not yet been identified in association with a fireball, but this is not very surprising since, as Hughes points out, "anomalous noise seems to be associated with brighter fireballs (average magnitude -13) which are rare objects indeed."

Not only are the anomalous sounds rarely produced, but their perception threshold varies rather widely among the population. Such was the case with a recent large fireball event in Australia.

Observational Data

In the early morning of 7 April 1978 a large fireball of visual magnitude -16 passed over the east coast of New South Wales, Australia, including the metropolitan area of the city of Sydney, and was seen by hundreds of witnesses.

At an early stage, it became evident that any resulting meteorite or meteorites would have descended into the sea approximately 70 kilometers offshore. However, one-third of the eyewitness reports described anomalous sounds coincident with the passage of the fireball. These prompted a more extensive investigation, including personal onsite interviews.

Most of the reports of anomalous sounds bear a close resemblance to those quoted by Romig and Lamar (4). They strongly suggest that the passage of a fireball generates a real physiological sensation in many, but not all, observers, which is manifest only when the fireball is a large one. Otherwise such reports would be much more frequent. The reality of the effect is supported by three of the reports where the perception of a strange sound clearly preceded visual identification of the fireball.

The fireball itself exhibited no unusual features. It is quite normal for a large fireball to explode, as most of the observers noted. This occurs when the at-

Summary. A very bright fireball observed over New South Wales in 1978 produced anomalous sounds clearly audible to some of the observers. An investigation of the phenomenon indicates that bright fireballs radiate considerable electromagnetic energy in the very-low-frequency (VLF) region of the spectrum. A mechanism for the production of VLF emissions from the highly energetic wake turbulence of the fireball is proposed. Trials with human subjects revealed a very extended range of thresholds for the perception of electrically excited sounds among a sample population, particularly when the VLF electric field excites surface acoustic waves in surrounding objects. This fact, together with variable propagation effects and local conditions, can account for the sporadic distribution of reports of anomalous sounds from fireballs and auroras.

ous observations of hissing sounds heard as the fireball passed more than 50 miles from the observers. He was so convinced of the veracity of the observations that he would not reject the anomaly and decided that he "would leave it as a point to be cleared up by future observers." It must be stressed that these anomalous sounds are not to be confused with the normal acoustic phenomena—sonic booms and rumbles—which travel at normal velocities and are heard some time after the fireball has passed the observer.

An interesting summary of all of the

tion to instances where the sensation of sound quite clearly preceded visual observation of fireballs and rejected opinions denying the existence of a physical phenomenon. Ingalls (7) quoted in full a specific account of noises produced by a large fireball which was observed by a geophysicist, B. W. Hapke, and his wife near Ithaca, New York, in 1960. Hapke stated, "The hissing and crackling noises were definitely associated with the meteor, although we cannot be sure whether or not they appeared to be coming directly from the meteor or from all around us."

The search for a physical explanation of these sounds has led to some bizarre suggestions, such as Khan's (8) hypothe-

The author is associate professor of physics at the University of Newcastle, New South Wales 2308, Australia.

atmospheric retarding force exceeds the crushing strength of the meteoritic material (10), and at this moment the fireball is normally close to maximum brilliance.

There were no reports of radio interference, fading, or blackouts at the time of the fireball. Also, no reports of abnormal signals in telephone or telex circuits were received, probably because any disturbances would pass unnoticed at such an early hour. The lack of independent electrical or electronic detection of electromagnetic radiation from the fireball is unfortunate but not unusual. Almost all of the many reports summarized by Romig and Lamar (4) have a similar lack.

At a station near Woodville, New South Wales, 90 km from the fireball ground track, geomagnetic micropulsation recording equipment failed to register any signal in the frequency range 0 to 1.5 hertz at the time of the fireball, as evidenced by records kindly supplied by Fraser (11). This negative result is not too surprising because the theoretical

magnitude of the perturbation of the geomagnetic field is in the range 10^{-11} to 10^{-13} tesla directly underneath the trail (12-15), which is comparable with the limiting sensitivity of the micropulsation recording equipment.

Fireball Energetics

A fireball of apparent visual magnitude -16 traveling at 20 km/sec at an altitude of 20 km is produced by a meteoroid mass of approximately 5 metric tons. This mass value is a best-fit estimate in rough agreement with the mass/luminosity relation published by Hughes (16), although it has more recently been pointed out by ReVelle (17) that there is a need to determine a more reliable mass/luminosity relation for the study of meteors, meteorites, and fireballs.

Assuming an effective meteoroid frontal area A equal to 1 square meter and taking the drag coefficient C_D to be unity, which is appropriate for a sphere moving

at a velocity v of 20 km/sec at constant altitude where the air density ρ_a is 10^{-4} kilogram per cubic meter, the equation $E' = 1/2 \rho_a C_D A v^3$ yields a rate of deposition of energy of 4×10^{11} watts at maximum.

Of this energy, upwards of 90 percent is carried away by the intense Mach 60 shock wave, the remainder being dissipated in the wake or lost as radiated energy. The latter may be estimated quite simply by treating the fireball as a blackbody with an emitting area of the order of 10 m^2 . Although the stagnation temperature at the leading edge will be 25,000 K for such a fireball (18), the effective temperature T , based on excitation temperatures found from spectroscopic observations of fireballs by Cepelcha (19), will be closer to 6000 K. This gives a radiated power $P = \sigma A T^4$ (where σ is the Stefan-Boltzmann constant = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) of the order of 10^9 W , which is less than 1 percent of the total energy deposition and will be neglected.

If we now conservatively assume that 2 percent of the total energy is dissipated in wake turbulence, the amount available to excite oscillations in the ionized plasma in the trail is of the order of 10^{10} W .

In an earlier search for radio noise from meteors, Hawkins (20) concluded that meteors show a surprisingly low efficiency in converting kinetic to radio energy. The meteors studied by Hawkins were no brighter than magnitude -1, whereas the 1978 fireball had a luminosity 10^6 times greater. This makes the absence of radio emission all the more surprising. Certainly a large amount of input energy is available, so the next problem is to identify the likely spectral range of any possible fireball radiation other than the thermal emission already considered.

Spectrum Constraints

In considering potential regions of the entire electromagnetic spectrum in which radiation may act as a carrier of the energy perceived as anomalous sounds, the first and most obvious step is elimination of all radiations on the ultraviolet side of the visible spectrum, since no ionization is produced beyond the immediate vicinity of the fireball, indicating that atmospheric absorption is complete. Energy radiated in the visible and infrared windows of the atmosphere cannot penetrate buildings and must also be eliminated, because two of the three people who reported hearing the fireball before seeing it were indoors at the time.

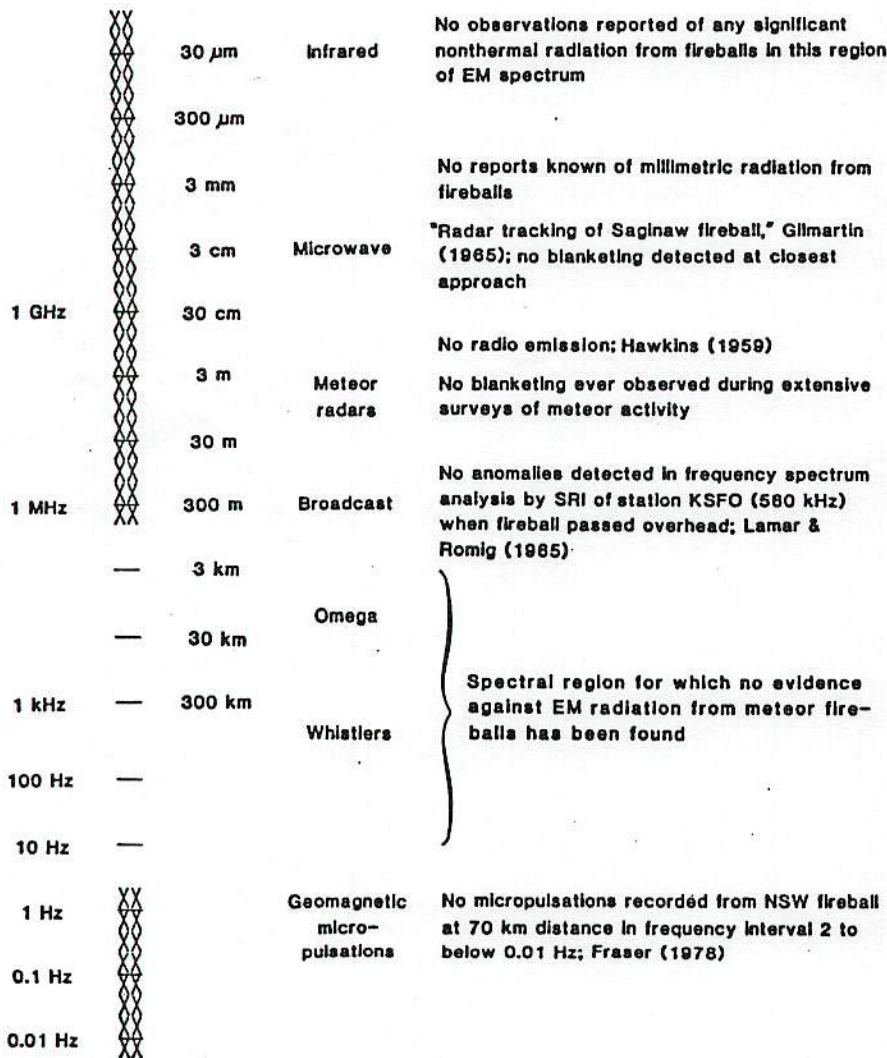


Fig. 1. Fireball electromagnetic (EM) radiation spectrum. Other abbreviations: SRI, Stanford Research Institute; NSW, New South Wales.

MSS
054

This leaves only radio energy. A diagram of the radio spectrum from the microwave region down to frequencies detectable on micropulsation recording equipment is shown in Fig. 1.

Emissions in the centimetric region may be eliminated by considering an interesting observation of the 1964 Saginaw (Texas) fireball reported by Gilmarin (21). This large fireball, from which a 100-kg meteorite was later recovered (22), was tracked with very high precision by a radar installation, which recorded the whole of its flight through the atmosphere. Following the disintegration of the fireball, the radar tracked three separate fragments for a further 3 seconds. There was no reported blanketing of the radar echo by noise emitted by the fireball plasma.

In the high-frequency (HF) and very-high-frequency (VHF) radio bands, extensive radar observations of meteor activity have failed to detect signals generated by meteors. In his search for such emissions, Hawkins (20, 23) obtained negative results at frequencies of 30, 218, and 475 megahertz. Following a Canadian meteor survey lasting more than 11 years, in which the 32-MHz radar observations were recorded on film, McIntosh (24, 25) reports that no fireball echoes exhibited any blanketing effect that could be attributed to electromagnetic radiation produced by the fireball. The same is true of the 69-MHz radar observations obtained over several years in the Southern Hemisphere meteor surveys conducted from New Zealand by Keay and Ellyett (26).

Lower in the radio spectrum, the AM broadcast band is the region most thoroughly monitored. In one of the reports of the 1978 New South Wales fireball, unusual sounds thought at first to be from a radio continued to be perceived after the radio was turned off. The same appears to be true of the 1963 San Francisco fireball described by Lamar and Romig (27), who cite three reports of anomalous sounds from a total of 65 reports. The 1963 fireball passed directly over radio station KSFO on 560 kilohertz, which was at the time being attentively monitored by a station engineer who was trying to identify an unrelated beeping signal later traced to accidental triggering of a time-marker oscillator. Spectrum analysis by the Stanford Research Institute of the monitor tape of the broadcast revealed no trace of a signal emanating from the fireball.

Fireballs are known to cause interruptions to distant broadcasts, as reported for example by Folinsbee and Bayrock (28) in their study of the 1963 Peace

River fireball. In this case, intense ionization due to the fireball in the E and D regions of the ionosphere caused the deep fade noted in the reception of a distant radio station, CJCA, on 930 kHz. A report many years ago by McKinley and Millman (29) of radar noise starting 1 second or so after strong meteor echoes has often been quoted (4). This was most likely due to forward scatter of signals from distant transmitters, again caused by the intense fireball ionization at high altitudes.

The only region of the radio spectrum for which convincing negative evidence of fireball emissions is not readily available is the very-low-frequency (VLF) region. A search of the literature pertaining to VLF emissions brought to light a paper by Johler and Morganstern (30) describing the propagation of an electromagnetic pulse originating from a nuclear explosion in the lower atmosphere. The greater part of the radiated radio energy from a nuclear explosion lies in the electromagnetic frequency range 5 to 20 kHz.

It is also pertinent to note that emissions of radio noise associated with auroras exhibit a power spectrum that peaks just above a low-frequency cutoff, which is usually around 2 to 6 kHz (31), and that there are countless reports, dating back to antiquity, of auroral displays being heard as well as seen (32).

Source Mechanism

In paraphrasing their study (4) of electromagnetic effects associated with fireball entry, Lamar and Romig (33) note: "There are two general explanations for anomalous sounds. The first possibility is that the fireball emits electromagnetic radiation which is somehow transduced into sound waves at the surface of the ground. The second possibility is that the passage of the fireball perturbs the Earth's electric field sufficiently to cause local electric discharges on the ground near the observer."

The latter mechanism was investigated by Ivanov and Medvedev (34), who obtained theoretical results indicating that electrostatic effects are produced by polarization of the ionized fireball trail, but the potential gradients produced are not significantly greater than ambient values. On the other hand, the generation of electromagnetic radiation by a meteor fireball has apparently escaped theoretical attention, and emission of energy in the VLF region of the spectrum has not been ruled out.

It is appropriate to remark that the ex-

tremely high-energy density in the turbulent wake of the fireball should excite all oscillatory modes possible in the ionization present. The scale of the turbulence will be comparable with the meteoroid diameter d , which, at an entry velocity v , will create new eddies at a rate v/d —in the present case $15,000 \text{ sec}^{-1}$. However, the collision frequency is too high and the geomagnetic field too weak to provide the charge separation necessary for appreciable electric dipole radiation near this or any other likely frequency, such as the ion cyclotron frequency.

Because of the high collision frequency, $6 \times 10^{11} \text{ sec}^{-1}$ at an altitude of 20 km, it is not profitable to seek a generation mechanism for meteor VLF emissions by examining the production of auroral radio noise, because it takes place in regions of the geomagnetic field where the collision frequency is very much lower (35).

As suggested by spectrum considerations already discussed, a parallel might be sought between electromagnetic emissions from a meteor fireball and the radio pulses produced by nuclear explosions in the atmosphere. For nuclear radio pulses three primary mechanisms have been recognized by Price (36), who comments, "A great deal of work on the generation of electromagnetic pulse by nuclear detonations, including the initial formulation of most of the generation mechanisms, remains available only in classified reports." Of the available unclassified material, Kompaneets (37) and Karzas and Latter (38) give a brief treatment outlining two ways in which a nuclear fireball interacting with the geomagnetic field will generate electromagnetic radiation. The first is through the intense current pulse of Compton electrons, and the second is by the expulsion of the geomagnetic field from the ionized region surrounding the fireball.

The meteor fireball lacks the radiation flux to support the first mechanism, but the hydrodynamic expulsion of the geomagnetic field bears examination. The geomagnetic energy density is given by $U_m = B^2/2\mu_0$, where B is the geomagnetic field and μ_0 is the permeability of free space; its value is normally 10^{-3} joule per cubic meter, which is six orders of magnitude lower than the thermal energy density in the fireball trail. When the ionization recombines, the expelled field collapses into its original volume, radiating the excess energy stored when the field was compressed outward. The energy release occurs randomly, with spectral components up to the eddy frequency.

From an approach based on skin depth

considerations, it can be shown that the expelled field will penetrate the fireball plasma in a time no greater than $t_p = \mu_0 e^2 n_0 r_0^2 / 2m\nu_c$, where n_0 and r_0 are the initial electron density and trail radius, respectively, ν_c is the collision frequency, and e and m are the charge and mass of the electron. Taking $r_0 = 1$ m and $n_0 = 10^{22}$ m⁻³, assuming total ionization as an upper limit, we get $t_p \leq 3 \times 10^{-4}$ second, which means that the geomagnetic field can be expelled only from the first few meters at most of the trail of a magnitude -16 fireball. The power radiated amounts to no more than $U_m A \nu$, where A is the cross-sectional area of the plasma and ν the fireball velocity, which yields a mere 40 W. Hence it is apparent that the mechanisms operating to produce VLF radiation from a nuclear fireball are insignificant for a meteor fireball unless it is of comparable dimensions.

However, the magnetic field reestablished in the fireball plasma will be controlled by the plasma motions provided the magnetic Reynolds number $R_m = \mu_0 L_p \nu_p \sigma$ is large compared with unity. Here L_p and ν_p are scale length and velocity for the plasma motion, and the conductivity $\sigma = ne^2/m\nu_c$ is 5×10^2 mho/m in the plasma, where n is the instantaneous electron density. For a reasonable scale of turbulence in the wake, $R_m = 5$; although this is low, R_m becomes larger as the scale values are increased and is sufficient for the transfer of the abundant wake energy into magnetic field energy for as long as the electrical conductivity remains adequate. When the conductivity falls, due to recombination or electron attachment as the plasma cools, the twisted and extended magnetic "spaghetti" relaxes, releasing its strain energy as VLF fluctuations of the geomagnetic field.

The mechanism is in accord with the observational finding that only very large fireballs give rise to reports of anomalous sounds, because they are the only fireballs that penetrate the atmosphere to a low enough altitude to produce a turbulent boundary layer and wake (17). Furthermore, the magnetic Reynolds number is quadratically related to the size of the fireball through its dependence on both the scale length and velocity of the wake turbulence.

Anomalous Hearing

In the *Handbook of Sensory Physiology*, Simmons (39) remarks, "Probably no single topic about hearing has generated as much speculation and controversy as has electrical stimulation of the ear and

of hearing." He then observes that "A certain confusion still exists today about what happens when an audio frequency current is applied in or near the ear, because there is more than one form of electrical hearing." Some of the more quantitative electrophonic experiments have been performed by Sommer and von Gierke (40), who exposed their subjects to both electrode and electrostatic stimulation over a range of frequencies from 100 Hz to 100 kHz. From the exposure of their subjects to electrostatic fields, Sommer and von Gierke obtained threshold data which indicated that electric field strengths exceeding 5×10^3 volts per meter are necessary for detection. Such field strengths are typical of the electromagnetic pulses from nuclear explosions rather than the VLF emissions from meteor fireballs.

Sommer and von Gierke noted that they had great difficulty in eliminating airborne artifacts when using large electrodes for electrostatic excitation of the head. They therefore abandoned the use of large electrodes. This distinction is irrelevant when considering anomalous meteor fireball or auroral sounds provided the causal agent is an electrostatic field variation. Indeed, it has often been suggested that such sounds are produced in the immediate vicinity of the observer by energy transmitted as an electromagnetic wave.

Turning to magnetic rather than electrical perception, some remarkable sensitivities have been reported for honey bees and pigeons, where responses to variations of 10 gammas and less than 70 gammas, respectively, have been described by Keeton *et al.* (41) (1 gamma = 10^{-9} T, or roughly 10^{-5} of the geomagnetic field). These results are in dispute (42), but in a review of the subject Ossenkopp and Barbeito (43) stated that "Magnetic fields have been shown to have a biological effect on a variety of life forms ranging from unicellular organisms to man." The field levels are generally of the same order of magnitude as the geomagnetic field or higher and rapid variations at VLF have not been deeply explored. However, at a somewhat lower frequency, Tucker and Schmitt (44) reported that in more than 30,000 trials on more than 200 persons exposed to 60-Hz alternating magnetic fields of 7.5 to 15×10^{-4} T root-mean-square, no real perception occurred.

In the light of these effects, both electric and magnetic, an opportunity was taken to conduct some tests with human volunteers exposed to electrostatic fields and magnetic fields, singly or crossed, varying at frequencies of 1, 2, 4, and 8

kHz and wideband noise. Purely acoustic tests, with a loudspeaker, were also conducted at the same frequencies. The magnetic field was generated by a large Helmholtz coil, which produced a maximum field of 10^{-4} T, 1.5 times the geomagnetic field. The electrostatic field was generated by a heavy electrode of effective area 4×10^{-2} m² suspended approximately 0.25 m above the subject. Direct acoustic radiation was attenuated more than 20 decibels by surrounding the electrode with a foam polystyrene enclosure and interposing a large sheet of the same foam material between the enclosure and the subject. Tests with and without earplugs indicated that the auditory effects were being produced electrostatically rather than acoustically, and tests with a sensitive sound-level meter indicated the presence of only very low levels of acoustic sound.

The results of the tests on 44 subjects showed that magnetic fluctuations at the frequencies listed above were not perceived. However, the electrostatic responses were highly variable from subject to subject over and beyond the dynamic range of the equipment, which, in terms of power, extended more than three orders of magnitude. Peak-to-peak variations as low as 160 V/m (60 V/m root-mean-square) were perceived in the electrostatic field at frequencies of 4 and 8 kHz by the subjects with sharpest acuity. There was a fairly general, but certainly not proportional, relationship discernible between electrostatic and acoustic thresholds as a function of frequency. The full results of these tests will be published elsewhere, but the conclusions related to this study are that an electrostatic field of 160 V/m peak-to-peak amplitude, varying at upper audio frequencies, can be perceived by human subjects either by an electrophonic mechanism or by acoustic signals generated in the close vicinity of the ear by metal or dielectric objects vibrated by the field. Furthermore, the sensitivity of various individuals to electrostatically produced "sounds" varies by factors of at least 10^3 in terms of power, which helps to explain why only some individuals report hearing anomalous fireball sounds.

Conclusions

A peak-to-peak variation of 160 V/m in the E vector of an electromagnetic wave detected at a distance of 40 km from a fireball requires a total radiated power of 2×10^{10} W. However, this distance is of the same order as the wavelength of the

VLF radiation which is confined to the earth-ionosphere cavity and which has the effect of magnifying the effective power, provided absorption losses are not high. If the cavity effect and local conditions together act to concentrate the effective power in the vicinity of some observers, it should not be impossible to reconcile this power level with the amount of power available in the fireball wake. Also, if the generation of surface acoustic waves in the upper audible range by the varying electric field acting on objects close to the observer is as effective as laboratory trials suggest, it should be possible to reduce the power levels by a further factor of at least 10^2 .

To confirm the existence of VLF emission from meteor fireballs, it will be desirable to compile and disseminate annual lists of fireballs (45). Each occurrence should be timed as accurately as possible to ensure positive identification of fireball events on the chart records of VLF receiving stations engaged on other work, such as whistler detection. VLF energy from a meteor fireball should propagate globally in the earth-ionosphere duct and have a distinctive time/frequency spectrum compared to lightning discharges or nuclear bomb detonations in the atmosphere. It seems more than likely that VLF receiving networks established for nuclear test monitoring must have already recorded many meteor fireballs, but they may not have been identified for want of fireball sighting data.

In 1 year only about 50 fireballs as large as the New South Wales fireball en-

ter the earth's atmosphere, and of these fewer than three are observed and reported, the remainder being over the sea or unpopulated areas or behind clouds. From any given inhabited region such a fireball event will be seen on average at intervals of 30 to 100 years, depending on the cloud cover statistics of the region.

To sum up, it now appears to be certain that meteor fireballs are perceived aurally by a significant number of observers. The energy transfer appears to occur at very low frequencies in the upper audio range emitted by the fireball as electromagnetic radiation. Further work is now indicated to determine more precisely the mechanisms of electrostatic-to-acoustic transduction involved and the conversion of energy into VLF radiation from the energy of turbulence in the fireball wake.

References and Notes

1. M. F. Romig and D. L. Lamar, *Sky Telesc.* 28, 214 (1964).
2. Sir C. Blagdon, *Philos. Trans. R. Soc. London* 74, 201 (1784).
3. L. LaPaz, *Adv. Geophys.* 4, 217 (1958).
4. M. F. Romig and D. L. Lamar, *RAND Memo. RM-3724-ARPA* (1963).
5. J. A. Udden, *Science* 46, 616 (1917).
6. H. H. Nininger, *Out of the Sky* (Univ. of Denver Press, Denver, Colo., 1952).
7. C. E. Ingalls, *N.Y. State J. Med.* 67, 2992 (1967).
8. M. A. R. Khan, *Nature (London)* 155, 53 (1945).
9. D. W. Hughes, *ibid.* 254, 384 (1975).
10. E. L. Krinov, *Principles of Meteoritics* (Pergamon, London, 1960).
11. B. J. Fraser, personal communication.
12. A. W. Jenkins and B. W. Duvall, *J. Geophys. Res.* 68, 599 (1963).
13. L. S. Marochnik, *Geomagn. Aeron.* 4, 149 (1964).
14. Yu. N. Savchenko, *ibid.* 15, 738 (1975).
15. _____, *ibid.* 16, 304 (1976).
16. D. W. Hughes, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 166, 339 (1974).

17. D. O. ReVelle, *J. Atmos. Terr. Phys.* 41, 453 (1979).
18. J. A. Fay et al., *AIAA J.* 2, 845 (1964).
19. Z. Ceplecha, *Bull. Astron. Inst. Czech.* 24, 232 (1973).
20. G. S. Hawkins, *Nature (London)* 181, 1610 (1958).
21. J. N. Gilmartin, *Meteoritics* 2, 365 (1965).
22. I. Halliday, personal communication.
23. G. S. Hawkins, *Astrophys. J.* 128, 724 (1958).
24. B. A. McIntosh, personal communication.
25. _____, *J. R. Astron. Soc. Can.* 61, 191 (1967).
26. C. S. L. Keay and C. D. Ellyett, *Mem. R. Astron. Soc.* 72, 185 (1969).
27. D. L. Lamar and M. F. Romig, *Meteoritics* 2, 301 (1965).
28. R. E. Folinsbee and L. A. Bayrock, *J. R. Astron. Soc. Can.* 58, 109 (1964).
29. D. W. R. McKinley and P. M. Millman, *Proc. IRE* 37, 329 (1949).
30. J. R. Johler and J. C. Morganstern, *Proc. IEEE* 53, 2043 (1965).
31. J. E. Maggs, *J. Geophys. Res.* 81, 1707 (1976).
32. W. Petric, *Keoeiti—The Story of the Aurora Borealis* (Pergamon, New York, 1963).
33. D. L. Lamar and M. F. Romig, *Meteoritics* 2, 127 (1964).
34. V. V. Ivanov and Yu. A. Medvedev, *Geomagn. Aeron.* 5, 216 (1965).
35. D. A. Gurnett, *J. Geomagn. Geoelectr.* 30, 257 (1978).
36. G. H. Price, *Rev. Geophys. Space Phys.* 12, 389 (1974).
37. A. S. Kompaneets, *Sov. Phys. JETP* 35, 1076 (1959).
38. W. J. Karzas and R. Latter, *J. Geophys. Res.* 67, 4635 (1962).
39. F. B. Simmons, in *Handbook of Sensory Physiology* (Springer-Verlag, New York, 1976), vol. 5, part 3, p. 417.
40. H. C. Sommer and H. E. von Gierke, *Aerosp. Med.* 35, 834 (1964).
41. W. T. Keeton, T. S. Larkin, D. M. Windsor, *J. Comp. Physiol.* 95, 95 (1974).
42. J. P. Beaugrand, *ibid.* 110, 343 (1976).
43. K. P. Ossenkopp and R. Barbeito, *Neurosci. Behav. Rev.* 2, 255 (1978).
44. R. D. Tucker, and O. H. Schmitt, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* BME-25, 509 (1978).
45. Data filed at the Center for Short-lived Phenomena of the Smithsonian Institution could provide the basic information for such reports.
46. I thank the University of Newcastle for granting a period of study leave and the Herzberg Institute of Astrophysics, National Research Council of Canada, and the Physics Department, University of Western Ontario, for their hospitality and assistance; all of these enabled this work to be undertaken. The helpfulness of J. Hollis and his colleagues at the Australian Museum, Sydney, in sharing observational reports of the New South Wales fireball is gratefully acknowledged.

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 107, NO. A7, 10.1029/2001JA000310, 2002

Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs

Goran Zgrablić,¹ Dejan Vinković,² Silvija Gradečak,³ Damir Kovačić,⁴ Nikola Biliškov,⁵ Neven Grbac,⁶ Željko Andreić,⁷ and Slaven Garaj⁸

Received 23 September 2001; revised 13 November 2001; accepted 13 November 2001; published 23 July 2002.

[1] Electro-phonetic meteor sounds, heard simultaneously with the meteor appearance, are a longstanding problem due to their nonintuitive nature. Previous investigations have been undermined by lack of instrumental recordings. Here we present the first instrumental detection of electro-phonetic sounds obtained during the observation of 1998 Leonids from Mongolia. Two Leonid fireballs of brightness -6.5^m and -12^m produced short, low-frequency sounds, which were simultaneously recorded by microphones in a special setup and heard by different observers. Simultaneous measurements of electromagnetic ELF/VLF radiation above 500 Hz did not reveal any signal correlated to the electro-phonetic event. The lack of signal was explained by the low frequency of electro-phonetic sounds. We show that physical characteristics of Leonid electro-phonetic sounds cannot be completely explained by existing theories and that further theoretical refinement and observational work is needed. Finally, we tentatively suggest the possibility of stronger than expected coupling of fireballs with atmospheric charge dynamics and ionosphere. **INDEX TERMS:** 6245

Planetology: Solar System Objects: Meteors; 2435 Ionosphere: Ionospheric disturbances; 6929 Radio Science: Ionospheric physics (2409); 2411 Ionosphere: Electric fields (2712); **KEYWORDS:** meteors, Leonids, electro-phonetic sounds, ELF/VLF, ionosphere disturbances

Table 1. Witness Reports of the Electro-phonetic Sounds During the 1998 Leonids Collected by the Global Electro-phonetic Fireball Survey^a

No.	Time, UT	Sound	Duration, s	Witness	Meteor Magnitude
1	1933:12.1 (16 Nov.)	pop-like	0.12 ± 0.01	2	-6.5 ± 0.5
2	2028:25.2 (16 Nov.)	pop-like	0.074 ± 0.004	6	12 ± 1
3	$\approx 0400:00$ (17 Nov.)	"whoosh"	≈ 1	1	≈ -10
4	unknown (16/17 Nov.)	crackling	1 - 2	1	≈ -5
5	$\approx 0700:00$ (17 Nov.)	sizzling (white noise)	≈ 3	1	"light up the whole sky"
6	$\approx 0900:00$ (17 Nov.)	sizzling, "like bacon frying"	≈ 1	3	-2

^aFrom [Vinkovic et al. 2000, also see <http://gefs.ccs.uky.edu/>]. Report 1 and 2 belong to our group. Electro-phonetic event 6 is also described by Drummon et al. [2000].

2004年のしし座流星群の各トレイルデータ

(暫定版 計算：佐藤幹哉)

※全て光圧は考慮されていない。摂動は9惑星と月、3小惑星。

●各トレイルのデータ (1699~1965年放出)

放出年	放出速度	Δa	日付	時刻	太陽黄経	$\Delta r(\text{AU})$	fM
1965	120.96	1.35	11/17	18:22	235.315	-0.0017	1.15
1932	69.02	0.74	11/17	18:03	235.301	+0.0074	0.82
1899	52.76	0.56	11/19	13:54	237.145	+0.0167	0.36
1866	20.61	0.21	11/20	20:49	238.445	-0.0081	0.072
1833	14.90	0.15	11/20	08:15	237.916	-0.0108	0.075
1800	13.84	0.14	11/20	00:48	237.603	-0.0106	0.065
1767	14.84	0.15	11/19	17:49	237.309	-0.0071	0.0036
1733	20.82	0.22	11/20	06:26	237.840	-0.0023	0.10
1699	7.50	0.08	11/20	19:39	238.396	-0.0169	0.0043
1699	7.68	0.08	11/20	20:03	238.413	-0.0180	0.031

Δa 母天体の a とトレイルの a の差
 fM 1公転時のトレイル密度 \pm
 とし、何公転もすると密度が
 うすくなる

※時刻は日本時。

2004年は各トレイルが地球とあまり接近しないため、残念ながら大規模な出現は、基本的にのぞめないと考えられる。

●今年0.003[AU]以内に接近するトレイルのデータ (1069年~1965年放出)

放出年	放出速度	Δa	日付	時刻	太陽黄経	$\Delta r(\text{AU})$	fM	α deg	δ deg	V(km/s)
1965	120.96	1.35	11/17	18:22	235.315	-0.0017	1.15	153.64	+21.61	70.81
1733	20.82	0.22	11/20	06:26	237.840	-0.0023	0.10	155.19	+20.76	70.80
1333	14.27	0.14	11/19	15:39	237.218	+0.0018	0.022	154.95	+21.28	70.64
1167	13.10	0.13	11/21	18:54	239.374	+0.0029	0.0048	156.27	+20.54	70.67
1135	11.75	0.12	11/21	17:21	239.309	+0.0006	0.0039	156.21	+20.48	70.73

※時刻は日本時。

- ◆ 各トレイルについて：いずれも日本からは観測できない時間帯である。
- ◆ 1965年放出トレイル：放出速度が約121[m/s]と、とても大きい。おそらく検出は困難。
- ◆ 1733年放出トレイル：今年もつとも出現の可能性のあるトレイル。ただし距離は-0.0023[AU]と若干遠いため、中規模の極大(HRは数十か?)までと推定される。また放出速度が約21[m/s]と比較的大きいので、流星光度が暗めの極大となる可能性が高い。
- ◆ 1333年放出トレイル：Vaubailonさんが見いだしたトレイル。fM値が1733年と比較して約5分の1と、トレイル自体の濃度が小さい。距離も+0.0018[AU]とあまり近づかず、小規模な極大まで。
- ◆ 1167年放出トレイル：fM値、距離とも条件は悪く、検出は困難。
- ◆ 1135年放出トレイル：fM値が0.0039ととても小さい。ただし+0.0006[AU]と最も接近するので、もしかしたら小規模な極大が観測されるかもしれない。放出速度は1733年トレイルよりも小さいため、期待される流星の光度は明るめである。

なお、1733年については近日点通過前後での放出を検討(概算)。 $\Delta T = -175$ 日で地球と交差し、その時刻は6:15(日本時)。また $\Delta T = \text{約}+200$ 日でも地球と交差し、その時刻は6:25(同)。 $\Delta T = 0$ でも6:26と大差なく、これらより1733年トレイルは6:10~6:30あたりで極大を迎えそうである(いずれにしても日本からは電波以外では観測できない時間帯であり、残念)。

3. 今回の観測

日時：1998年11月16/17日

観測地：モンゴル、ウランバートルから20km。(-27±3°C)

観測機材：広角ビデオカメラ、VLF受信機2台、マイク2種類（電磁音用と開放マイク）。眼視観測あり。

ビデオカメラは全天の55%をカバーし、最微星0等級。

電磁音用マイクは箱の中に入れ、外の音をほとんどシャットアウト。箱の中に紙とアルミホイル。

通常マイクは眼視観測の声も録音。

4. 記録された電磁音

	等級	継続時間	周波数	音量	最大光度より	観測者
No.1	-6.5±0.5	0.12±0.01 秒	主に250Hzより低	e 50dB、o 75dB	0.70±0.05 秒前	2名
No.2	-12±1	0.074±0.004 秒	37~44Hzがピーク	e 70dB、o 85dB	0.6±0.3 秒前 (推定)	6名(内3名音のみ)

※ No.2はビデオ写野外。ともに、ELF/VLF波検出されず。

※ ELF/VLF信号は他の2火球で検出。流星光度最大時。電磁音を形成するには弱すぎる。

※ 電磁音マイク(e)の大きさから、この音は箱の中で作られた。

5. 従来の電磁音理論

(1) key は電磁波を受けた不導体が音を出す可能性について調べた。→不導体の形と大気のコンドィションによる。

(2) 低周波電磁波発生メカニズム

(2-1) key が提唱、Bronshen が発展 (KB理論)：流星の尾の中のプラズマの擾乱の中で、地球磁場が乱されて電磁波が発生。流星のプラズマ擾乱層に入る必要あり。→レイノルズ数が 10^6 を超える流星プラズマの擾乱でないと発生しない。-12等以上のゆっくりした大火球で高度20km以下に突入の必要。しし群では200cm、3000kgが必要。

(2-2) EB理論：タイプ2(短時間音)は-6等より暗くてもOK。ただし、高度90km以下でburstした瞬間にVLF発生。(他にも問題点あり) (※細かいところは完全に理解できていません)

6. Discussion

(1) 音の強さから電磁波強度を推定

「電磁波→音」の変換効率 T_m ：最大で0.1%。現実には $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 。

「流星体運動エネルギー→電磁波」の変換率は $T_m=0.1\%$ で、No.1が0.8%、No.2が0.03%。 $T_m=10^{-6}$ だと、変換率が100%を超える。

(2) 室内実験より

超音速物体は帯電し、尾内で分極。電子はイオンより動きやすいため。

(流星体は負に帯電、Wakeには電子が集まり負に帯電、流星体の直後に正イオンが集まる。)

(3) 電磁音のための電磁波放出のシナリオ(?)

- ・電磁音 No.1は流星高度が110kmに達したとき、No.2は85~115kmに達したときに検出されている。
- ・Leonidsは超高層から発光 → 早くから分極 → 帯電は十分大きい → 電離層(E層)の下部、高度110kmで、特別な(Unusual)現象を引き起こす → 音を作るのに十分な電磁波放出

(4) その他

- ・スプライトも流星をきっかけに発生しているのが観測されている。
- ・電磁音には、大きな電界が必要。→電離層との相互作用は無視できない。
- ・他にも火級はあったが、電磁音は観測されていない。どうしてか？
→ 流星の突入角と観測者の位置関係が大変重要。(電離層に対する放出体の方向、位置が大変重要)

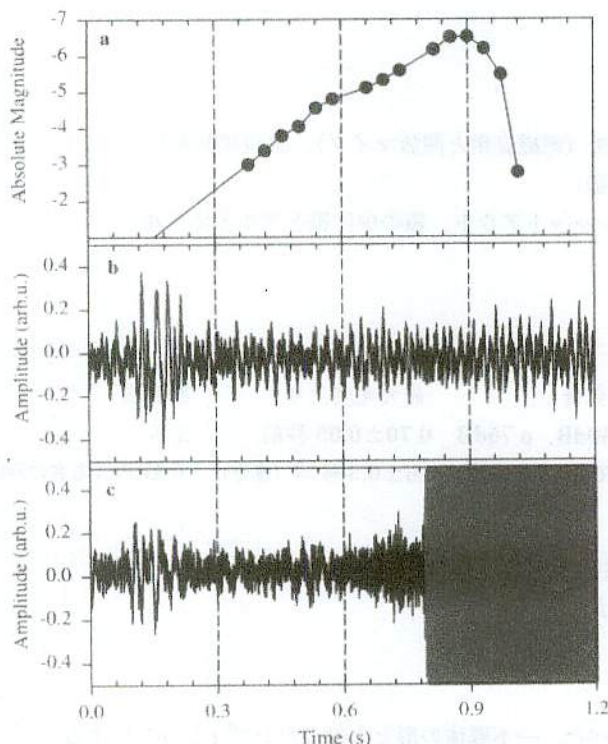


Figure 1. Recorded electrophonic sound from $M_v = -6.5^m \pm 0.5^m$ fireball: (a) the meteor brightness recorded by video; (b) the “electrophonic” channel; (c) the “open” channel. Amplitude is given in arbitrary units, time 0.0 s = 19 hours 33 min 12.0 s UT (16 November 1998) Saturation of the signal in the open channel is due to uncontrolled audio reactions from observers, but no signal leakage is visible on the electrophonic channel.

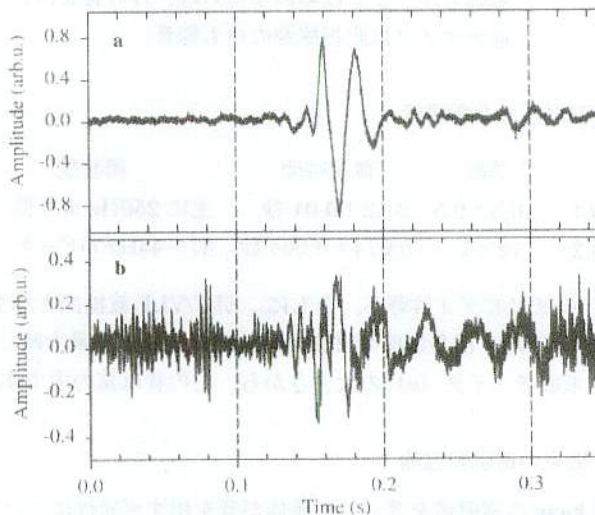


Figure 2. Recorded electrophonic sound from $M_v = -12^m \pm 1^m$ fireball: (a) the electrophonic channel, (b) the open channel. Amplitude is given in arbitrary units, time 0.0 s = 20 hours 28 min 25.0 s UT (16 November 1998).

1. 流星の音は2種類

(1) 通常之音 (hypersonic booms)

低空での airburst で生じる。2~3 分後に聞こえる。

(2) 電磁音 (electrophonic sound, or electrophone)

流星と同時に聞こえる。まれな現象であり研究されていない。

シュメール人のころから記録あり。1676 年 Geminian Montanari が同時に聞こえるのはおかしいと気づいた。

流星を見る前に音を聞いた人や、家の中にいて聞いた人も多い。→ 錯覚ではなく、実在の現象。

原因：人間に聞こえる音の周波数の電磁波 (20Hz~20kHz, ELF/VLF) を放出、地上に達して音が作られるのでは。近くの物体や周囲から聞こえたという報告あり。

電磁音は珍しく、周囲の雑音で聞こえないことも多い。→ 一生に一度のイベント

→ 過去に音は記録されていない

(-12 等のペルセ群、1998 年、1999 年のしし群で VLF の検出報告あり。)

2. 電磁音は2種類

タイプ 1： ヒュー、パチパチのように継続する音。遅い大火球で発生。

タイプ 2： 短時間の音。ボン、カチッなど。高速の火球で発生。タイプ 1 より暗くてもよい。

- 1833 年のしし群大出現時、Olmsted は音の報告も集めた。小さな爆発、子供の“pop gun”に似ている。流星が木のてっぺんのすぐ下を通るとき、木に達する直前に“pop”。

非常に大きな大気現象火球によって出される不可解な音を説明することにおける進展

COLIN S. L. KEAY

Department of Physics, University of Newcastle, N. S. W., Australia

要約

約10km離れて観測される火球。そのキラキラと流れていく火球と同時に奇妙な音が聞こえるが、それは2世紀以上謎であった。現在、その奇妙な音を説明するため、「電磁波音」という言葉が広く用いられ、火球が通過して後に聞こえる通常の音とは区別されている。流れる火球から発生する電磁波音の物理的原因については観測と実験により究明され証明がなされてきた。流星科学の中でも遅れた分野であるこの問題の歴史は、ある程度詳しく示されている。そしてかなり最近まで問題を解決するため多くの困難があったことに注目が集められている。

始めに

大きな火球の大気圏への突入は、大きな危険にさらされることなく人間が目撃することのできる最も印象的な自然現象の1つである。最も大きくそして最も壮大な火球をみることは非常に稀であり、ほとんどの人は、生きている間に遭遇することはない。実際に光りを放つ非常に明るい火球を目撃した人々のおよそ10パーセント (LamarとRomig, 1964年) は、火球が上空を通過する際に生じる音(ヒュー、シュー、ポン)により精神状態が高められる。このような音は、必ず光速で伝達されるという点で非常に特異である。この例外的な現象は、2世紀以上前から認識されていたにも拘わらず、ごく最近まで説明ができなかった。この論文の目的は、明るい火球から生ずる特異な音の観測に関する長い歴史を説明すること、そしてこのミステリーが自然科学的に分かりやすく解釈されるに至った過程を記述することである。

しかし、先ず最初に用語についてである。火球の飛行に伴い聴くことができる特異な音は、今後「電磁波音」と呼ぶこととし、火球の光が消えて数秒ないし数分してから音波として伝えられるドーンとかゴロゴロという音と区別する。「電磁波音」は「電子効果」と混同されてはいけない。「電子効果」とは、「電子聴覚」として理解されており、体内を

適当な規模と周波数の電流が通過することにより生ずる音に関連するものである(Adrian1977年: Walker1988年)。又、言葉を短くするために「bolide」という用語を「大きく明るい火球」の代わりに用いることとする。

歴史

明らかに火球の飛行による電磁波音であると思われる記述は、紀元817年の中国によるものが最初である。火球が見えると同時に鶴の群れが喧嘩をしているような音がしたとある(Astapovich, 1951年: LaPaz1958年)。更にそれより遡り、古代においても電磁波音が聞かれていた可能性がある。天空の音として、ヘシオドスの著作やキリスト教聖書(例: 2章の2)で記述されているもののいくつかは、火球音であったかもしれない。

1719年3月19日に、英国中で大火球による電磁波音が発生したことは疑いがない。エドモンド・ハレー(1719年)の報告によれば、何人かの目撃者が、火球が飛行しながら「シュ

ー」という音を発するのを手にとるような近くで聞いたという。しかし、彼はこの主張を空想の結果として退けた。これは、多くの観測点からの慎重な三角測量の結果、火球の飛行高度は60イングリッシュマイルを超える高さであることを証明し、この高さは音源がすぐに到達するには離れすぎているからである。ハレーは、他の大気中の現象と比べ流星が非常に高い高度で発生すること、そして、それらの速度が1分間に300マイル以上という信じがたいものであることを最初に示した者のひとりであった。

次の50年の間に、王立協会が発行する学術論文集「フィロソフィカル トランザクション(Philosophical Transactions)」(Short1740年とPringle1759年)に電子火球に関する記述が2箇所あり、更に非常に強いオーロラから発生する電磁波音と思われるものに対する注意を喚起した記述もあった。

1783年に、人の目を引きつけて離さないような火球がスコットランド、東イングランドそしてヨーロッパについてはその一部の上空を飛行した(この出来事に対する最近の評価と流星天文学に及ぼした重要性については、1989年のBeech論文を参照)。1784年に、英国学士院会長Thomas Blagdonにより、電磁波音に関する報告が集められた。Blagdonは以前軍医であり、遠くにある大砲が火を放って発射された後、その音が遅れて聞こえることをよく知っていた。それ故、50マイル以上離れた火球が視覚的に認知されると同時に音が聞こえることにハレー同様当惑した。彼は目撃者の証言を真実であると確信し、その例外的事実を拒絶しなかった。そして、この問題の解明を未来の観測者に委ねた。再び、ハレーに続きBlagdonも、音の知覚が恐怖心による精神的なものであると考え、この課題の解決にはよい影響を与えなかった。著名人によるこれらの結論は以後2世紀に及び、電磁波音の研究に絶えずつきまとうこととなった。

ハレーとBlagdonの見解は、1784年までの科学水準の限界により制限されたものであることを理解されなければならない。Coulombは静電気の基本原理を発見していなかったし、Hertzが電波の存在を実証するまでには、更に1世紀必要であった。

この間に、数多くの流星からの電磁波音や大変明るいオーロラからの同種の音に関する報告があったが、いずれも原因は不明であった。1833年11月13日に発生したしし座流星雨の際にも、大火球の発生と同時に聞こえた音について多くの報告がなされた。エール大学の数学と自然哲学の教授であるDenison Olmsted(1834年, 1835年)はこれらの現象を集め、次のように記載した。「数名が聞こえたと言われる音は、ロケット花火が突進する際の音かロケット花火が爆発する際の小さな爆音に例えられる。これらは多くの例で様に発生しているため、我々は想像上のものか外部要因によるものであると考えてしまう。

Hertzの実験から1年後に、Samuel Sexton(1885年)は、ネーチャー誌に投稿をした。これによると、オーロラから聞こえる音は、耳鳴りの際の苦痛な響きと同一の原因ではないかと示唆しており、注目を集めた。

電界と電波というものがよく理解されるに至っても、火球から一瞬の間の発する音の問題を解決することは容易ではないままであった。唯一の証拠が一部の人々の証言であり、音の発生を全く予知できず、実際に音を聞いたという人もお互い近くで観測し、火球を発見したグループの中でもわずか1人か2人であった。火球の電磁波音の発生は、10~100 km離れた火球の視覚的認知と同時に起きる。このため、Denning(1903年)のような著名な流星観測者をして、ハレーやBlagdonの判断を支持させることとなった。「庭を歩いていたら遠くからシューという音が聞こえ、見上げると流星が飛んでいた」(1903年Denning著から引用)という否定的な証言が数多く存在するにもかかわらず。

一方で、W. F. Denningは、素晴らしいアマチュアの天体観測者の一人であり、天文学の数々の分野で世界的な尊敬と名声を得ており、流星天文学の分野における実績については、

おそらく最も現在記憶にとどめられている。(Beech、1990年)それ故、「シューというような音は、想像によるもの」又は、「観測上の幻像」(1907年)と結論付けたことは、流星学者に大きな影響を与えることとなった。彼は、後に、流星から発する電磁波音に関するオーロラ音を次のように表現した。「想像上のものか又は観測される現象と直接結びつかない理由によるもの」(Denning 1915年)

こういった考えは、1917年10月1日にテキサス州全域の夜空を明るくした大きな火球が現れた時の世論であった。テキサス大学で工学を専門とするUdden教授は、テキサス中央部で影響を受けるポイントがあるとして、その地点を突き止める目的で60以上の事例を集めた。彼は、次のように記述した。「320km以内で明るい物体を見た5~6のグループからその物体からの音を聞いたとの報告を受けた。そして、その音は光と同時に聞こえたと思われる。」音に関する9つの報告を分析した結果、彼は次のような結論を出した(1917年)。

「もし、これらの観測が主観的なものでないとしたら、音の原因は火球が地球に接触する際の波動か、植物や人工物のような地上にあるものに求められる。これら植物や人工物は、火球が大気中で音波に変換される際に、その一部が分解されるのではないか。」彼の非常に適切な結論は、「この音は、地上にある物体に関係している」と考える観測者の一人に非常な刺激を受けたものである。(Udden 1917年b)

Uddenの鋭い仮説は、直ちに試された訳ではなかった。なぜなら、電磁波音を発する火球を一定の箇所で観ることは稀であったからである。科学雑誌に電磁波音を発する火球に関する報告が載ることは毎年ある訳ではない。そして、直接の経験なしにアマチュアの流星学者ができることは、報告を集め照合することのみであった。そのような例としてUddenの同僚であるアメリカ人のC.C. Wylieを挙げることが出来る。彼はアイオワ大学の数学と天文学の教授であったが、Popular Astronomy誌に「流星からの音」という論文を投稿し、「流星からの音は、間違いなく心理学上のものである」と断言した。

UddenよりもDenningの見解に従ったWylieは、明らかに彼の初期の大火球調査の影響を受けた。この火球は、1929年7月にイリノイ州中央部で発生したものであった。彼はこの現象の概要を次のような記事にまとめた。「多くの手紙により、ヒューとかシューといった火球の音は報告されている。また、これとは異なる音の報告もある。しかし、同じコミュニティから静かな環境の中でポーチに座っていたが、全く何も聞こえなかったという報告も多数寄せられている。更に、火球の出現と音を聞き取るまでの時間的間隔はかなり必要と思われるが、それについての報告はない。そのケースもその間隔は数分であるはずだ。従って、これらの音は、流星からのものと認める訳にはいかない。

後に、Wylie は彼が体験した事例について話をまとめ上げた(1939年)。すなわち一般人は心理的誤りを犯しやすく、火球の音についてもそういった事が根拠となるものである。更に彼は、流星が50マイル以上離れていることを知っている人は決して音が聞こえたなどという報告はしないと主張した。

DenningやWylieのような世間に認知された流星専門家の否定的見解は、電磁波音を発する火球の課題から多くの流星学者を遠ざける事となった。しかし、例外もあり、その1人がH. H. Niningerであった(1939年)。彼は突出した流星学者の1人であり、この問題を心理学ではなく、物理学として考えようとした。そして、ついに、観測者の環境がよければこのような音は現実的であると確信した。Niningerの見解は、音が聞こえたのは建物の後方か中からだとする報告に根拠をおく。更に、昼間の流星の場合、音は光が見える前に聞こえたとの報告も論拠となった。

Niningerは「音の空気伝播と同様な伝播が流星に関してあるかもしれない」と1939年に語った。後の彼の論文では「1934年にアメリカ国立標準技術研究所のエルモア.R. ウェーヴァー氏は会話の中で『おそらくエーテル波は観測者の周辺で物体が発火する際、電流に

変わる』と示唆した。」と記述した。Niningerは更に「無線技術者の間では常識とされていることではあるが、強い電波発信機の近くにある様々なタイプの受信機は時々放送されている番組を停止するとし、これらの例は無線の信号が調整され、音として再構築されるとした。同様の見解はマイクロ波やミリ波に関してもAnyzeskiにより示されている(1946年)。

Weaverの仮説は成功するようか期待を持たせた。しかし、最も大きな火球から発せられる無線信号についての証拠が不足するため受け入れられなかった。更に、彼がとなえる変換プロセスが明快ではなかったためこの問題は依然結論が出ないままであった。

ここで、名称の問題に戻りたい。Niningerは「エーテル」という言葉をエーテル波が音波に自然変換する際に発生する音を示す時に使うおうと提案した。そして彼自身もこのような音は聞こえると理解していたと思われる。その後直ぐ、1940年にOmsk大学のDravert教授は、「電磁波音火球」という言葉を紹介し、この言葉は火球音現象を語る際に急速に受け入れられることとなった。

BarringerとHart(1949年)は、流星から音が発生する仕組みについて議論する過程において、心理学を論拠とする考え方には消極的となった。入手した多数のデータをまとめた後、彼らは次のように結論付けた。すなわち、流星からの音は、観測者の想像上の産物として退けることは出来ないと。彼らはこのような音は電波によって運ばれると推定した。そして、大きな火球は、約10億ワットの単位でエネルギーを簡単に分散させると判断した。この高いエネルギーレベルの中で、熱電波の構成要素は、とても弱く、彼らは火球の光は音の周波数に調整されると考えた。この考えは、科学の世界では馴染みがなく、発生と発覚の構造に関し大きな問題となった。それ故、彼らは火球が電離化される際銀河系宇宙間での物質を放射するのかもしれないとした。これは、火球の音は地球外で発生しているという意味である。

BarringerとHartの示唆は、ホーキンスによって真剣に取り上げられた。ホーキンスは火球からの放射物の測定を実施した。その測定は、磁石発電メーターにより、475,715メガヘルツ、30メガヘルツそして1ヘルツの周波数で行われた。ホーキンスが観測した火球は等級がマイナス1等級から5等級のものであった。彼はこう結論づけた。「火球が1ヘルツから500メガヘルツの周波数の間で音を発生していないということはおそらく真実であろう。500メガヘルツはこういった測定の感度の限界を超えるものであるが、したがって、火球は驚くべき低い効率で運動エネルギーを放射エネルギーに変えている。」

その間に、電磁波音を発する火球の問題は、ソビエトで精密に調査された。Astapovich教授が始めた調査が最も注目されるものであり、彼は電磁波音を発する火球について、広範な資料をひとつにまとめたのであった。そして詳細な調査から重要な結論を改めて導き出した。例えば、電磁波音を持続して発する火球は、絶対光度マイナス9等級より明るいものに限るとか、火球の軌道は水平線に対しほんの小さな傾きで進むが、中緯度地点で観測された以降は低い傾きで進むということである。他のソ連の科学者は、火球から聞こえる鋭い音や大きな響きは火球の崩壊や爆発と結びつけて考えた。彼らはこういった音を単に心理学上の効果と促えていたが、火球から発する他の種類の電磁波音については、確実に存在することを認めた。電磁波音に関するソ連の火球科学者間での論争は西欧諸国と同様強行われた。学士院会員であるレビンは、心理学上の理由であることを支持し、電磁波音の存在を熱心に支持するAstapovichと議論を交わした。

雑誌の記事の中で、経験豊かな隕石学者であるLapazは、一般の考えは隕石の特異な音に関する事案に基づいて、Uddenの考えを受け入れる方向に強く向かっていると記載した。大火球を目撃した多くの人達と直後に直接することが増加するに従い、彼はこの火球の音

が実際にある得るものと考えた。そして、この原因を合理的に説明するための試みが数回にわたり行われたと述べた。

この様な状況の下で、アメリカ国防省がこの課題を調査すべきであると決定した。それは、ソ連の科学者が自然発生する電磁波音現象を活発に研究した際に作成した文献からもよく知られている。アメリカ国防省はランド社と契約を締結し、Mary Romig と Donald Lamarがこの仕事を担当することとなった。この現象の解明は、大気圏に突入する大きな物体の大きさ、性質、軌道を測定する新しい技術につながる可能性があり、このことが彼らの研究を後押しした。

RomigとLamarは、65頁の未分類のリポートを作成した。そこで、88の参考文献、41の特異な音の観測例(7箇所の詳細地図を付録Aとして添付)、そして63のロシアにおける観測例(付録Bとして添付)を示した。彼らが得られた証拠を基に完施した詳細な研究は、当時もそして今もこの問題を研究する学生にとって必須の図書となっている。彼らは、音の発生メカニズムに関して確固たる結論に到達した訳では無かったが、音は電磁気の変動に起因すると考えた。そして、今後はプラズマのさやに関する特性、イオン化された軌跡について研究がなされることをすすめた。RomigとLamarから発生プロセスに関しての指示はなかったが、彼らは次のように語った。「乱気流によって通常のプラズマ放射エネルギーが非常に強められることがある。RomigとLamarの論文には 論が無かったため、多くの流星学者は火球からの電磁波音に関する説明を心理学に求めようとした。

こういった点から火球からの音を研究する観測者が直面する困難な点を要約することは意味がある。

- 1 電磁波音の発生はまれである。火球、オーロラ、稲妻からの電磁波音を聞いた人は殆どいない。あるいは電磁波音を録音するためのテープレコーダーを持っていた人もいなかった。
- 2 電磁波音の発生は予知できない。観測グループの全ての人が音を聞く訳ではない。
- 3 音の伝播は光の伝播と同様、瞬間的である。しかし電磁気の変動により発生する音は、静電気となるブラシ放電以外に知られていない。そして、そのような放電が伝わるのは長くて300kmである。
- 4 大きな火球やオーロラからは大規模な電磁気変動は見られなかった。
- 5 電磁気エネルギーが音に変換する筋道が全く不明確である。
- 6 火球やオーロラから強い電磁気エネルギーを発生する物理的メカニズムが知られていない。

こういった課題が1980年にKeayにより出版されて問題の解答に先立ち残されていた。

1978年、ニューサウスウェールズ大火球

1978年4月7日朝、ニューサウスウェールズ州東部の空は、月もなく、真っ暗であったが、大火球の出現により日中と同様の明るさとなった。その火球は南西から飛来し、シドニー上空を通り、ニューキャッスルを過ぎ海中へ数珠つなぎ状態で落ちていった。日の出90分前の早朝であったにもかかわらず、数百人の目撃者によりマスコミには電話が殺到した。火球は最大等級が少なくともマイナス15等級の明るさで、多くの目撃者は一時的に目が見えなくなった。

このような明るい火球が発生した時の常として、火球が視界にある間は奇妙な音を聞いたという報告が相当数あった。当初は、私も世の趨勢に従い心理学上の問題と促えた。しかし、火球やその光が出現する前に音を聞いたという明らかな例がある事を知り、音の存在を確信した。

火球の地上レベルでの軌跡から20Km離れたシドニーのローズ湾でS・Mc-Grathは、光を見

る前に轟音を聞いた。それはまるでアパートの隣人が網戸をパタンと閉めるような音であった。すなわち、音の大きさはさほどではなく、むしろガタガタというような音であった。この証人は、窓に近づき、火球が遠のいて、そして消えるのを見た。

火球の軌跡から20km離れたシドニーのエッジクリフではA. Hayesが高速で走行する特急列車か旅行用高速バスのような音を聞いた。その次に電気が放電するような音を聞き、裏庭が昼間のように明るくなった。

火球の軌跡から40km離れたヴェールズポイントでは、J. Irelandは車が近づいてきたような音を聞き、右肩後方から光が煌めくの見、全てが月光に照らされたように明るくなった。

ニューキャッスル州のKotaraは火球の軌跡から40km離れているが、N. Jonesは火球がぱっと燃え上がった時、ボンという音を聞いた。しかし、それは寝ている人を起こすような大きな音では無かった。一方、自動車の反対側のドア近くに立っていた友人は何も聞かなかった。

火球の出現と同時に発生する音の印象として次のようなものがある。「大きなヒューという音」、「変圧器や遠くからのサイレンのようなブンブンうなる音」、「10数えるため列車のエンジンから聞こえるシューという蒸気音」、「突然強風に襲われるようなヒューという音」、「テープレコーダーに録音できるヒューという低いなり声」、残念ながら最後の証人はその時すぐにテープレコーダーを用意できなかった。

1978年に発生した火球が広く知られると共に、これ以前に発生した火球の証人達の記憶を呼び戻し、彼らも上述の例に極めて類似した音を火球の発生と同時に聞いた事が判明した。このことから私は、火球の原因を心理的な要因に求めることは現実的ではなく物理的要因に求めるべきと確信した。

火球音の説明に関する調査

明らかに、火球からのエネルギーを火球音を聞いた人々の周辺へ伝達するのは、電磁機によるものに違いない。音として聞こえるブラシ放電を引き起こした高い静電気の場を可能性から除外することはできない。しかし、これらだけによって30km~40kmの高度を飛来する火球の北上面での軌跡から100km以上離れた場所でも火球音がよく聞こえたことを説明するのは難しい。大気圏に垂直に突入する流星体が生み出す静電気の場については、Ivanov とMedvedevにより研究されてきた。そして、そのような高度で誘導されたエネルギーは、大きな流星体で4~500ボルトであり、これは火球効果を発生させるにはとても充分なものはいえないことを示した。

電磁波音は火球が急勾配の軌道や垂直な軌道をとる場合よりも傾斜度の低い飛行経路をとる場合に確認される (Romig と Lamar, 1963年)。急勾配の軌道や垂直な軌道をとる場合、電子的本質を有する音の継続時間も一般的にとても短い。

既に活用されていたホーキンスの研究成果では、少なくとも調査された周波数においては、流星から電磁気のエネルギーは発生しないと広く考えられていた。しかし、私は大気に低く突入した非常に大きい流星や火球は、プラズマ振動を喚起すると考える。ホーキンスが観測したような小さい物体が高い高度で突入する場合はプラズマ振動を喚起しないであろうが。

文献調査によると、火球はラジオやテレビの周波帯以上の周波数では電磁波を放射することはない。少なくともマイクロ波帯までは放射しない。一方、音が発生した事実は電磁波のエネルギーは10ヘルツから1万ヘルツの間である音が聞こえる範囲に存在することを示している。そして、この場合、信号を確認するための調整は必要なく、単純な変換行為があれば充分であることも。極長波帯において電磁波がないという観測結果は存在しない。従って、この電波帯においてエネルギー移転があるということは仮説として成立する。そ

のエネルギー移転とは観測者の聴覚器官の近く又はその中で発生した音のエネルギーへの変換である(Keay 1979年)。この考えに対して有力な火球研究者は否定的であった。「この分野は物理学者よりも心理学者にとってより実りが多いのではないかと。(anon 1979年)

この点において、Romig と Lamarが「音は観測者の近くで電氣的に伝わり、交換されたとの示唆は注目されるべきことである。周波数は必ずしも一定ではない。なぜなら電磁周波が存在しない音の周波数帯においては変換という言葉が必要であるからである。後に発表された文書のなかで、Romig と Lamarは電磁波が直接脳に作用した可能性について言及している。しかし一方で、これとは関係なく「火球というよりも火球周辺の物体から発生したと思われる音を聞いたと報告した者も数多くいる」と主張した。Ingallsはコーネル大学の放射物理学者であるB. W. Hapke博士の発言を引用している。博士は、妻とともに電磁波音を発する火球を目撃した訳であるが、博士曰く、「シューあるいはパチパチという音は明らかに火球と結びついている。ただ、その音が火球そのものから発しているのか周辺のものから発しているのかはわからない」

超長波電磁エネルギーが音へ直接変換する証拠は少なくとも2つの原因が考えられる。まず一つは、稲妻は電磁エネルギーを非常に広い範囲へ放出することである。これについては、何年間も雷に先立ち「ヴィート」、「カチッ」、「慌ただしい音」、「シュー」という例が報告されている。もう一つは、放電の前に急激に増加する地球上の電磁場の拡大によるものである。しかし、鋭い音は通常閃光と同時に起こる。カチッという音は、大気中における核兵器の爆発時においても聞こえると言われている。そして、この爆発から強い電磁の圧力が観測され、およそ12キロヘルツにも達すると知られている(Johler と Morganstern 1965年)。

電磁エネルギー発生プロセス

大火球は、数100ギガワット以上の運動エネルギーを放散する。この内、光を発生させるために使われるエネルギーすなわち伝達速度が合成に使われるものは数パーセントに過ぎない。イオン化されるために使われるエネルギーも同様である。そして残ったエネルギーは、主に熱として放散される。プラズマの通り道には非常に高い密度のエネルギーが存在しており、可能な限りの振動形態を引き起こす。それは聴覚が可能な周波数を含んでいる。問題は、現実的に発生の仕組みをみつけることである。一つの可能性として火球の軌跡にあるプラズマ内の混合磁気液体波の刺激を通じて発生することが考えられる。高度30 kmにおけるイオン密度 10^{23} m^{-3} に対してプラズマの振動はマイクロ波層において 10^{11} ヘルツである。地球の磁場内におけるイオン加速振動は約100ヘルツである。しかし、それらは少なくとも 10^8 ヘルツの高い衝撃波によって妨げられる。

Alfven(アルヴェーン)波を発生させるプラズマの軌跡内において、巨大な振動の可能性を調べると5500度の温度で完全にイオン化されたプラズマ内で上記の高度において衝撃波の周波数は

$$\sigma = \frac{e^2 n}{m_e v_c} = 7.5 \times 10^3 \text{ } \bar{\sigma} \text{ m}^{-1}$$

とする。

200mの軌跡を横切る効果的な振動の柱の長さを仮定すると、30kmの高度から典型的な軌跡密度値は、磁気流体波発生の可能性を決定し、数値は

$$L u = \frac{B L \sigma}{2 \pi^2} \sqrt{\frac{\mu_o}{\rho_o}} = 0.25$$

である(Alfven と Falthammar 1963年)。

このメカニズムだけでは音を発生するには充分ではない。

なぜなら、音を発生させるためには更に大きなエネルギーを必要とするからである。他に考えられる発生メカニズムを捜し、核爆発からの電磁放射の振動の生成について研究

が行われた。プライスによって議論されたメカニズムの中では、これらのX線やγ線放射は火球に関しては除外されるかもしれない。しかし、3番目のメカニズム、それは火球を取り巻くイオン化された地帯から地磁気帯を排除することを必要としているものであるが、これは調査の価値がある。

火球のプラズマ内にある一団毎の電磁エネルギーに対する熱の比率は次の条件によって与えられる。

$$\frac{3 \mu_0 \rho_p R T}{B^2 M} = 1.3 \times 10^8$$

その条件とは、分子重量 M が標準地の29であり、地磁気帯の強度 B が 0.3γ である。これは、プラズマ内のエネルギー密度が8等級であり地磁気帯の密度より大きい。それ故地磁気帯は簡単に火球により押しよけられてしまう。

火球を取り囲むプラズマから追い出された地磁気帯は非常に僅かな割合ではあるがプラズマの中に戻る。

$$t_p = \frac{\mu_0 \pi r^2}{2} = 5 \times 10^3 \text{ s}$$

追い出された地磁気帯は、火球軌跡プラズマを瞬時に突き通る。そしてガンマ線が最初の軌跡である距離(16等級の火球については1メートル)よりも大きな強度で、そしてイオン化される総量は上限であると考えられる。この結果は、地磁気の場合は、火球の軌道の最初の数10メートルのあたりから放出されることを示している。放出されるエネルギーは $u_m A v$ 以下に相当する。 A はプラズマの断面積であり、 v は火球の速度である。これは、16等級の火球でいえば100ワットに足りない電力を産出することになる。軌跡が拡大し、多くのエネルギーを地磁気場に抗するよりも周囲の気圧に抗することによって費やした結果である。明らかに核の火球から超長波の放射エネルギーを生産する仕組みはそのサイズとエネルギーが比較できるものでない限り流星火球にとって重要ではない。指摘されたように、最初の地球磁場の排除は一時のもので、地球磁場はプラズマ内に再び戻る。プラズマは火球の後方の僅かに離れたところにあり、後方乱気流の起こる僅かな間に戻る。再び定着した地球磁場は、 Re_p が1を越えるプラズマの動きによりコントロールされる。

乱気流 L_p の初期のサイズを火球そのもののサイズと似通ったものと仮定すると、すなわち、直径1mであるとすると乱気流運動の速度 v_p は火球の速度の10分の1であり伝導率は上記の値である。

$$R_m = \mu_0 L_p V_p = 20$$

この値は、電気の伝導力が高く留まっている限り、乱れ飛ぶエネルギーが電磁エネルギーに移行するのに充分である。

軌跡の中でおこる乱気流はエネルギーが小さな渦巻きに変わる際、特定の周波数を持つ。それはおよそ500Hz以上である。この乱気流は磁場の振動にエネルギーを持たせ、超長波又は極超長波の範囲で電磁エネルギーを放出する。蓄えられた磁気エネルギーの放出は伝導性が減少する時に起こる。伝導性の減少はプラズマが冷え、磁気レイノルズ数値が1未満となり、組み替えや電気結合の結果発生する。ねじれもつれた「磁気スパゲティ」は、ひずみエネルギーを電離層の穴の中で地磁場での振動として放出しながらゆるむ。この振動も100km超の波長を持ち、これは電磁波の同波長である3kHzと調和する。

上記で述べた大火球からの電磁放射エネルギーの生成に関する仕組みは、電磁波音は大火球によるものに限られているという観察結果とも一致する。

Astopovich(1958年)は次のように主張した。絶対等級マイナス9等級以上の明るさを持つ火球のみが持続する電磁波音を発生すると。この経験による基準は、その後標準計算によっても支持されてきた。この標準計算では、火球が大気を通過するために必要なものであり、磁場が動いたり止まったりし、乱れた跡を生成するために必要なものである。

上記の火球放射メカニズムが著者によって示された直後にBronshtenにより、これは裏付けられた。Bronshtenは、典型的な音を発する火球(マイナス13等級)もスペクトルの超

長波帯で100万ワット以上の放射能力を生み出すことを明らかにした。

電磁波音は、マイナス9等級以上の火球から発すると報告されている。その音は通常火球の燃焼や爆発と一致し、持続時間は短い。このような状況の下で、プラズマ火球は高速で飛行し、電波を発生するために必要な不安定な状態を作り出す。日本人の観測者は、ペルセウス座流星群の流星の写真を撮影することに成功した。その流星は爆発し「ボン」という火球音を発した。一方同時に別の2ヶ所から電波の記録が得られた。これは注目に値する功績である。というのも、電磁波音を発する火球は珍しく、そして無作為に生ずるからであり、それ故、電波放出を記録することはとても難しいからである。

現在、流星は飛行と結びついた電気と電磁石に係る現象に視点が終わりBronshen(1991年)はこのような効果の徹底的な調査を指揮し、この問題は解決されるまで程遠いと結論付けた。多くの試みが流星とその軌跡における電場と電流を調査するために行われたが、決定的な結論は得られなかった。流星は地球の電場で永久的でないパルツ(電流)を作り出すという主張が真実であるとは証明されていない。

電磁波音の変換プロセス

強い静電気が毛髪を逆立たせることはよく知られている。人間による電磁波音の聴覚(静電気の直接の知覚は音声周波数により異なる)は、1964年に Sommer と von Gierkeにより報告されているが、必要とされる静電気の強さは1メートルにつき数キロボルトといった強いものである。実験室で44人のボランティアを対象に行われた試験では1、2、4、8キロヘルツでの反応を調べたが、被験者によりその結果は様々であった。Sommer と von Gierkeによる発見は、少なくとも最も敏感でない被験者により確認された。4や8キロヘルツといった高い周波数では性格がゆるいか縮れ毛の被験者3名(内2名が女性)が最も感受性が高かった。彼らの電気の強さを感じる限界値は160 V/mであった。男性の被験者1名は、眼鏡を掛けた時、2と4キロヘルツで3から4デシベルの音を感じた。

これらの研究成果は、体内での電磁波音聴取過程よりも耳に近い体外でのエネルギー変換がより有力な論拠となることを示している。これは、Sommer と von Gierkeの観察から正しいと裏付けられ、電極から発生する聴覚エネルギーを除去することは大変困難であると証明された。又、上記の実験で電極の音を抑えるためには防音材が必要であることが分かった。後にこのような電磁波音が聞こえていることがより明らかになった。興味深いことにIngallsは同様の実験における同じ問題について、20から2万ヘルツの通常の音以外の効果を生ずることはないと言った。

同じ実験で、異なる音の周波数で磁場の音を聞くことができるかどうか確認する実験が行われた。最大の磁力である0.1mTに到達するまで(これは入手可能な装置で到達できる最大値である)被験者からの顕著な反応はなかった。

後に、別の無響室で植物を含む日常のものを対象とする実験が行われ、エネルギー変換を可能とするか否かが確かめられた(Keay と Ostwald, 1991年)。ピーク時で0.5、1、2そして4キロヘルツと変化する400 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-4}$ の電磁場ではアルミのクッキングホイールやタイプ紙は40から60デシベル(音区レベルは20マイクロニュートン)の音を生み出した。一方カサリナ松やギンバイカの小枝は10から25デシベルの音を生み出した。これらは最小の反応である。つまりこれらの例は変換能力を高めるため特殊な手法を用いた訳ではないから。勿論、更に大きな多量の実験体を用いれば、より少ない電氣的刺激で同様の音を発生させることが期待できる。更に音の領域内や振動周波数と反響する物体があれば、より高い反応を示し、音に対して影響を与えるであろう。

上記の実験で明らかになったのは、火球電磁波音の観測者の身近にあるありふれた物体のエネルギー変換率は70デシベル以上で変化し、それが、一見予測不能にみえる電磁波音の報告についてある程度まで説明できるということである。このことは、目撃者の報告にある音の強さの範囲から裏付けられる。その音の範囲とは、エネルギー変換が観測者の近くで起こると仮定し聴覚レベルに及び、20デシベル(かろうじて聞くことができるシューという音あるいは微かなため息)から少なくとも80デシベルかせいぜい90デシベル(10' 3w

ait)までである。例えば、1986年の西オーストラリア南西地区で発生した火球に際して、全く異なった場所に3人の証人がいたが、それぞれ「猛烈な爆発」、「とても大きな音」そして「轟き」と火球音を表現した。そして、3人とも90秒後にソニックブーム効果の音を聞いた。100を超える電磁波音に関する記録は、大きな音よりも微かな音の方が遥かに多いことを示している。これは、周囲のノイズレベルが多くの場合電磁波音を消していることを示唆している。

関連する現象

火球の爆発と同時に時々聞こえる音はさておき、以前言及したように火球音に明らかに関連する現象は、非常に明るいオーロラからの音である。その存在はオーロラの研究者により、熱心に議論されているが、オーロラから発生される音についての報告は、少なくとも1000年前に遡る(Dall' Olmo, 1980年)。オーロラの音に関する全ての課題は、SilvannanとTuanにより徹底的に調べられた。その結果次のような結論に至った(1973年)。

「観測に基づく証拠はオーロラからの音が実在することを裏付けている」

「最も可能性のある音の発生源は放電である」

「放電はオーロラに起因した電界が発生する」

このことは、生涯こういった音の研究を続けたトロント大学の故C. A. Chant教授の結論でもあった(Keay, 1990年)。1メートルあたり10kVというような非常に大きな電界が強烈なオーロラから観測された(Olson, 1971年)。しかし、彼が使用した装置は電界から大きな音の周波数を除外できなかったかもしれない。60年前、BurtonとBoardmanは、オーロラの光がきらめく時に発生する爆発による超長波の放射について報告した(1933年)。その後、多くの同様の観察結果があり、地球の極地は時として10億ワットの出力レベルでの強い放射源であることを証明した(Gurnett, 1974年)。発生メカニズムについては、4つの案が提案された(Gurnett, 1978年)が、この問題は解決されていない。

極超長波や超長波のエネルギーが音に直接変換するかもしれないという興味深い現象はしばしば報告される。強い放射線の放出とそれに続く地震との間の相関関係のようなものである(Corliss, 1983年)。地震に先立って聞こえる音に言及した多数の報告は、Milneにより集められた(1841年)。最近になるとこのような音の報告は少なくなってきた。これは人工的に発せられた、似たような音が増え、地震に由来する音の関心が減少したからである。しかしながら、地震から連想される音の周波数の電磁波による乱れは、この専門誌(PalTot, 1990年)の中で議論された。一方、Johnston(1987年)や他の研究者により言及された実験室での研究では、岩石の破壊が電磁気信号を生み出すことを示している。Cressとその同僚は900ヘルツから5キロヘルツの間でピークに達する信号を記録した(1987年)。大きな岩を爆発させる際にO' Keefe と Thielが行った現地調査結果(1991年)から5キロヘルツの周波数と数ボルトの電圧を持った電気波動が発生することが明らかになった。地震の際のより大きなエネルギー発散は、マグニチュードが高いほど何らかの徴候を発生させると期待されている。人の観察する地震音に関する報告は少ないため、こういった経験則と地震直前の動物が示す警告との問題は現段階では確定されていない。

最後に、この論文のテーマと同じような現象がNASAのスペースシャトルがフロリダに着陸しようとした時に最初の報告がなされた(Keay, 1985年)。ジョンソン宇宙センターのJ. Oberg と D. Potterは、シャトルが北テキサスとオクラホマ上空で大気圏に再突入しようとした際、ヒューっという音が聞こえたという人々の報告を受け始めた。音や放射信号を記録しようと数回にわたって試みたがミッションの変更やチャレンジャー号の大惨事により挫折した。スペースシャトルの再突入に関しては、火球の発生に比べ予測がし易く、録音装置の設置がやりやすいにも拘わらず現在のところ試みは成功していない。大きなロケ

ットが大気圏に再突入する際の破壊的な局面においても電磁波音は発生する。このような事案に関する報告書が証人の1人（クィーンズランド州Townsville のD. Deane）により間もなく発行される。これはCosmos 2204ロケットが大気圏に再突入した1992年7月31日の早朝、北クィーンズランド一帯で観測された事案に基づくものである。

結び

火球から証人の耳へ管腔のスピードで様々の段階でエネルギー移動することの物理的に認められる説明が現在見いだされた。その説明は決して全てのケースを網羅しているものではなく、多くの点で更なる調査が必要となる。特に「マグネットスパゲティ」と呼ばれている電磁発生メカニズムについて、プラズマによる乱流作用も十分考慮に入れながら包括的に論ずる必要がある。そして電気負荷がかかった日常の物体が音響反応を起こすことについての分析も必要である。

質の高い観測データ収集が重要であり、優先順位も高い。火球の発生を記録することは難しく、発生自体がまれであるため、ほとんど困難ともいえる。又、質の高い観測データの収集は、低周波の記録との相互関係は時間の正確さが求められる電磁波音の観測結果を集めるという点からも重要である。

これについては、ロシアの流星科学者により長い間認められてきた。この科学者は600以上の電磁波音を発する火球の観測結果を含む5つのカタログを現在までに発行した（Bronshnten, 1991年）。欧米における唯一のこの様なカタログはRomg と Lamarの包括的研究の中に含まれる。しかし、100以上事例が集められたカタログが編纂され、国際流星機構(IMO)のWGNレポートの執筆者によりまもなく発刊される（Heerbaan74, B-2530 Boechout, Belgium）。

Wang, Tuan そしてSilvermanは、グリーンランドのスールにある低周波監視ステーションから集められたデータを用いて、限られた範囲であるが調査を行った。しかし、その結果は否定的であった（1984年）。火球の現像の発生する場所からは離れすぎていたし、観測された周波数は多分高すぎた。電磁波音の発生が確認された報告に関する火球について、より正確な電磁観察を行う必要性が高まっている。

最後に、地球科学者は、音に関する報告を更に真剣に考える必要がある。このことにより物理的なメカニズムを突き止めることが幾分進むであろう。火球からの電磁波音については、現在では流星学者の間でまともな課題として考えられている（Keay, 1992年b）。そしてオーロラや地震学者の間でも、この問題をもっと早く受け入れるべきであったと思われる。

謝辞

まず、カナダオタワ市のBruce McIntosh氏、イリノイ州デカルブ市のDoug ReVelle氏、イギリスシェーフィールド市のBill Jones氏、モスクワ市のVitaly Bronshnten氏、そしてイギリスエジンバラ市のBill Napier氏にこの研究を進める過程で有意義な議論をしていただいたことに感謝します。又、カナダオタワ市のIan Halliday氏、チェコアンドレジョブ市のZdenek Cepelcha氏には、貴重な火球に関するデータを頂きました。ありがとうございます。Newcastle大学には重要な議論がなされる会議等への出席に際し助成をいただきました。感謝します。特にお礼を申し上げたいのは、オタワにあるカナダ国立研究評議会のHerzberg天体物理研究所に対してです。親切に受け入れていただき、そのすばらしい蔵書のおかげで全く手に負えないと思われるような問題についても解決の糸口を見いだすことができました。そして最後に、寛大な態度で接し励ましていただきました旧ソビエト科学アカデミーの地球物理学委員会にお礼を申し上げます。

Progress in Explaining the Mysterious Sounds Produced by Very Large Meteor Fireballs

COLIN S. L. KEAY

Department of Physics, University of Newcastle, N.S.W., Australia

Abstract — Strange sounds, heard simultaneously with the sighting of brilliant meteor fireballs many tens of kilometers distant, have been an enigma for more than two centuries. The term "electro-phonetic sounds" is now widely used to describe them and distinguish them from the normal sonic effects heard after the fireball has passed by. A physically viable explanation for meteor fireball electro-phonetic sounds has been developed and verified by observation and experiment. The history of this neglected branch of meteor science is presented in some detail, drawing attention to the difficulties which stood in the way of a solution until fairly recently.

Introduction

The entry into the atmosphere of a large meteor fireball is one of the most awesome natural phenomena that a human being can witness without being greatly endangered. The largest and most spectacular meteor fireballs are very rare events, and few people ever see one during their lifetime. For about ten percent (Lamar and Romig, 1964) of those who do witness a very luminous meteor fireball, the mental impression is heightened by strange swishing, hissing and popping noises coincident with its passage across the sky. Such sounds are quite anomalous in that they imply acoustic propagation at the speed of light. This anomaly was first recognized more than two centuries ago, and has defied explanation until quite recently. It is the purpose of this essay to relate the long history of observation of anomalous sounds from bright meteor fireballs, and to recount the course of events which led to a viable physical solution of the mystery.

But first, terminology. For reasons that will emerge, the anomalous sounds heard to accompany the flight of a meteor fireball will from here onwards be called electro-phonetic sounds to differentiate them from the acoustically propagated booms and rumbles which are heard from seconds to minutes after the light of the fireball has extinguished. Electro-phonetic sounds should not be confused with the electro-phonetic effect, otherwise known as electro-phonetic hearing, which relates to the sensation of hearing arising from the passage of an electric current of suitable magnitude and frequency through the body (Adrian, 1977; Walker, 1988). Also, in the interests of brevity, the word bolide will be used in lieu of "large, bright meteor fireball", since that is its accepted meaning.

History

The first lucid account of electrophonic sounds related to the flight of a bolide originated from China in 817 A. D. At the same time as it was seen, the bolide made "a noise like a flock of cranes in flight" (Astapovich, 1951; LaPaz, 1958). It is very probable that electrophonic sounds were heard in more ancient times. Some of the celestial noises mentioned in the writings of early authors such as Hesiod and in the Christian Bible (for example Acts 2:2) may well have been electrophonic of bolide origin.

There is no doubt about the electrophonic effects of a large bolide seen over England on the 19th of March, 1719. Edmund Halley (1719) reported some eye-witnesses "hearing it hiss as it went along, as if it had been very near at hand," but he dismissed such claims as "the effect of pure fantasy." This rejection is related to Halley's realization, by careful triangulation from many observations, that "they abundantly evince the height thereof to have exceeded 60 English miles", which is far too distant for sound waves to arrive instantly. Halley was one of the first to show that meteors occur at a great height compared to most other atmospheric phenomena and that their velocity was "incredible", being "above 300 such miles in a minute."

During the next half century there were two further accounts of electrophonic bolides in the Philosophical Transactions of the Royal Society (Short, 1740 and Pringle, 1759) and another drawing attention to what now would seem to be electrophonic sounds emitted by an intense auroral display (Derham, 1727).

In the year 1783 a spectacular bolide passed over Scotland, eastern England and part of Europe (for a recent evaluation of this event and its importance to meteor astronomy, see Beech, 1989). Many reports of electrophonic sounds were gathered by the Secretary of the Royal Society, Thomas Blagdon (1784). Blagdon, a former army surgeon who was quite familiar with the delay between the flash and the boom of distant artillery, was, like Halley, perplexed by the simultaneous perception of hissing sounds with the visual appearance of a bolide more than 50 miles distant. He was so convinced of the veracity of the witnesses that he did not reject the anomaly and decided that he "would leave it as a point to be cleared up by future observers." Again, following Halley, Blagdon did a disservice to the subject by suggesting that the sound perception may be psychological through "an affrighted imagination." These conclusions, by eminent men, bedeviled studies of electrophonic sounds for two centuries.

It must be realized that the views of Halley and Blagdon were circumscribed by the limits of existing scientific knowledge: by 1784, Coulomb had not yet discovered the fundamental law of electrostatics, and a further century was to elapse before Hertz demonstrated the existence of radio waves.

Over the intervening period there were a number of inconclusive reports of electrophonic sounds from bolides and similar hissing noises from very bright aurorae. The great Leonid meteor shower of November 13th, 1833, gave rise to many reports of sounds accompanying some of the largest meteors. Denison

Olmsted (1834, 1835), Professor of Mathematics and Natural Philosophy at Yale, gathered many reports and wrote, "The sounds supposed to have been heard by a few observers, are ... represented either as a *hissing noise*, like the rushing of a sky rocket, or as slight explosions like the bursting of the same bodies. These comparisons occur too uniformly, and in too many instances, to permit us to suppose that they were either imaginary or derived from extraneous sources."

About a year after Hertz' experiment, a letter to *Nature* from Samuel Sexton (1885) drew attention to the similarity of sizzling, hissing and buzzing sounds to the affliction of *tinnitus aurium*, suggesting this to be the explanation for auroral sounds.

Even when electric fields and radio waves became well understood, the solution to the problem of instantaneous sounds from bolides remained elusive. The only evidence was anecdotal and the incidence of the sounds remained highly capricious, being sometimes heard by only one or two members of a group of eye-witnesses in close proximity to each other. This feature of the electrophonic bolide sounds, together with their simultaneity with a visual event tens to hundreds of kilometers away, undoubtedly led respected meteor observers such as W. F. Denning (1903) to uphold Halley and Blagdon's judgment, despite the existence of a number of reports suggesting otherwise, such as "While walking in my garden my attention was attracted by a distant hissing sound, and on looking up I saw the meteor" (quoted in Denning, 1903).

Although "W. F. Denning was one of those rare amateur astronomers who achieved world-wide respect and fame in several areas of astronomy ... he is probably best remembered today for his work in the field of meteor astronomy" (Beech, 1990). Therefore Denning's conclusion that "hissing and similar noises ... may be dismissed as imaginary," and is an "observational illusion" (1907) carried considerable weight among meteor scientists. He later likened auroral sounds with electrophonic sounds from meteors, stating, "They are either imaginative or due to causes not directly connected with the phenomena observed" (Denning, 1915).

Such was the climate of opinion when a spectacular bolide lit up the night sky of almost the entire State of Texas on the first of October, 1917. Engineering Professor J. A. Udden of the University of Texas gathered more than 60 reports of the event with the intention of locating its impact point somewhere in central Texas. He noted that "Several parties who saw the bright body at a distance of about 200 miles (320 km) or less, report hearing a swishing or buzzing sound, which seems to have been simultaneous with the appearance of the light." After analyzing nine reports of these sounds, he concluded (1917a), "If these observations are not subjective, the cause of the sound may perhaps be sought in either waves that, on meeting the earth, or objects attached to the earth, such as plants or artificial structures, are in part dissipated by being transformed into waves of sound in the air." His very apt conclusion was evidently prompted by one of the observers who "seems to refer this sound to objects attached to the ground" (Udden, 1917b).

Udden's perceptive hypothesis was not readily tested because of the rarity of electrophonic bolides at any given location. Every few years a report of an electrophonic bolide would appear in a scientific journal and, without first-hand experience of the event, all a meteor scientist could do was to gather and collate such reports. One such was Udden's fellow American, C. C. Wylie, Professor of Mathematics and Astronomy at the University of Iowa, who wrote an article "Sounds from Meteors" in *Popular Astronomy* (1932). In it, Wylie asserted "The explanation is without doubt psychological."

In following Denning rather than Udden, Wylie was undoubtedly influenced by his earlier investigation of the large bolide seen over central Illinois in July 1929. He concluded his summary of that event (Wylie, 1929) with the paragraph "Many letters report a swishing or hissing sound. Some report other noises; but we often have from the same community a definite report that no sound was audible to some one sitting on a porch where everything was quiet. Further, there is no mention of an appreciable interval of time between the appearance of the meteor and the hearing of the sound. In all cases the interval should have been minutes. Hence, none of these sounds can be accepted as from the meteor."

Later, Wylie (1939) embellished his case by lumping electrophonic bolides with other, better founded, examples of psychological errors affecting meteor reports from the general public. He also claimed that persons knowing that a meteor must be fifty or more miles away never report hearing such sounds.

The negative opinions of acknowledged meteor experts such as Denning and Wylie led many meteor scientists to shun the subject of electrophonic bolides. Among the exceptions was H. H. Nininger (1939), one of the first prominent meteor scientists to begin "to regard the matter as a problem in physics rather than psychology" and to "finally become convinced of the reality of such sound where the environment of the observer is favorable." Nininger based his view on the "Many cases (that) are on record where the informants insist that the sound attracted them from behind or within buildings, and, in some instances of daylight meteors, the sound was commented upon before any light was seen or known about."

Nininger had earlier (1934) proposed "that there may be, in connection with meteors, ethereal as well as aerial propagation of sound." In his later paper he revealed, "In 1934, Mr. Elmer R. Weaver of the U. S. Bureau of Standards suggested to me in conversation that possibly ether waves are transformed into sound waves upon striking objects in the environment of the observer." Nininger went on to report that it is a matter of common knowledge among radio engineers that many different kinds of object, in the vicinity of powerful radio transmitters, serve as receivers, "sometimes giving out very good reproductions of programs which were being broadcast." In these instances the radio signals were being rectified by the objects in order to demodulate and produce the audible sounds. Similar speculations involving microwave and millimeter-wave energy were presented by Anyzeski (1946).

Weaver's hypothesis came tantalizingly close to success: it was not accepted for want of evidence of radio signals from even the largest bolides. Nor had he been explicit about his suggested transformation process, so the subject remained open to speculation.

Returning now to the problem of nomenclature, Nininger (1939) proposed "that 'ethereal' be used as a designation for sound produced by the natural transformation of ether waves into audible sound" suggesting that he, too, must have been close to realizing how such sounds may be heard. Soon after, in 1940, Professor Peter Dravert, of Omsk University, introduced the term 'electrophonic fireball' (Bronshten, private communication) and this quite rapidly became the accepted practice in describing such events.

Barringer and Hart (1949), in discussing the mechanism of sounds from meteors, were unimpressed by psychological arguments. After summarizing the "mass of data" available, they concluded that "a meteor's audible accompaniment can scarcely be dismissed as a product of the imagination of the visual observers." They presumed that such sounds were carried by radio waves and estimated that a large bolide could easily dissipate energy at the rate of several gigawatts. Of this high level of energy, the thermal radio wave component was far too weak leading them to consider that the light of the bolide might be modulated at audio frequencies. This, of course, led to severe problems of generation and detection mechanisms quite unknown to science. They retreated to suggesting that the ionized wake of the bolide "may reasonably be expected to give off radiation of the intragalactic type," probably alluding to the early discoveries in radio astronomy of hissing signals of extra-terrestrial origin.

Barringer and Hart's suggestion was taken up in a serious way by Hawkins (1958a, b), who conducted a search for radio emissions from meteors at several frequencies, namely 475, 218 and 30 MHz and also at 1 Hz using a magnetometer. The meteors Hawkins observed had visual magnitudes between -1 and +5. He concluded "Thus it is probably true to state that meteors do not emit radio noise within the frequency range 1 Hz - 500 MHz above the limits of sensitivity of these measurements. Meteors therefore show a surprisingly low efficiency in converting kinetic to radio energy."

In the meantime, the problem of electrophonic bolides was under scrutiny in the Soviet Union. The most notable work was undertaken by Professor I. S. Astapovich, who compiled an extensive catalog of electrophonic bolides and drew several important conclusions from his detailed investigations (Astapovich, 1958): only bolides brighter than -9 absolute visual magnitude produce sustained electrophonic sounds; the majority of reports noted that the bolide trajectories had very small inclinations to the horizontal; and, since all of the bolides were observed at mid-latitudes, their low inclinations meant that they were moving at a large angle to the earth's magnetic field lines. Other Soviet scientists noted that the sharp crack or "peal" sometimes heard is always associated with the disintegration and detonation of the bolide. They considered these sounds to be a purely psychological effect, but accepted the physical

reality of other electrophonic sounds from bolides (see Romig and Lamar, 1963, p. 53). The controversy over the nature of electrophonic sounds was contested as strongly among Soviet meteor scientists as it was in Western countries: Academician B. Yu. Levin supporting the psychological explanation, while Astapovich, an ardent defender of the reality of electrophonic sounds, argued in favour of a physical explanation (Bronshen, personal communication).

In a review article, the experienced meteoriticist L. LaPaz (1958) observed that opinion had turned strongly towards accepting with Udden the objective reality of anomalous meteoritic sounds. He attributed this as a possible result of the "ever-increasing amount of prompt, first-hand interrogation of numerous witnesses of large fireball falls" and noted that "several attempts have been made to give rational explanation of their cause."

Such was the situation when the United States Department of Defense decided that the matter should be examined, not least because it was well known from the literature on the subject that Soviet scientists were actively investigating naturally occurring electrophonic phenomena. A contract was awarded to the Rand Corporation, which assigned Mary Romig and Donald Lamar to the work. Their "study was motivated by the possibility that a better understanding of these phenomena will lead to new techniques for determining the size, nature and path of any large body entering the earth's atmosphere" (Romig and Lamar, 1963).

Romig and Lamar's 65-page unclassified report presented 88 references, a catalog of 41 anomalous-sound observations with seven detailed maps (their Appendix A), and a further catalog of 63 Russian observations (Appendix B). Their detailed study of the evidence available was, and still is, essential reading for any student of the subject. However they reached no firm conclusion on the physical mechanism for producing the sounds except to attribute them to an "electromagnetic disturbance," and recommended that "the properties of the plasma sheath and ionized wake should be the subject of further research." Romig and Lamar gave no indication of the generation process other than to state (without a reference) that "the presence of turbulence can greatly enhance normal plasma radiations." As Romig and Lamar's report was inconclusive, many meteor scientists continued to invoke the time-honored psychological explanation for electrophonic sounds from bolides.

At this point it is worth summarizing the difficulties which faced any investigator studying electrophonic sounds, specifically those from bolides:

1. They are rare. Few people have ever heard them, either from bolides, aurorae or lightning. Nor has anyone ever had the good fortune to have had a tape recorder in readiness to record them.
2. They are evidently capricious. Not all witnesses in a group may hear them.
3. Their propagation is instantaneous, implying transmission at the velocity of light, but no electromagnetic disturbance had been known to pro-

duce sound except for electrostatic brush discharges. Such discharges do not propagate over distances of up to 300 km.

4. No electromagnetic disturbance of sufficient magnitude had ever been detected from large bolides or aurorae.
5. The method of conversion of electromagnetic radiation into sound was quite obscure.
6. No physical mechanism was known for the production of strong electromagnetic radiation from bolides or aurorae.

This is where matters stood prior to the initial resolution of the problem published by the author in 1980 (Keay, 1980b).

The Great New South Wales Bolide of 1978

On the morning of 1978 April 7, the dark moonless night sky above eastern New South Wales became as bright as day when a large bolide arriving from the southwest passed over the city of Sydney and headed seaward past Newcastle (Keay, 1980a). Despite the early hour, ninety minutes before sunrise, hundreds of witnesses deluged the news media with telephoned sightings. The bolide reached a maximum brightness of at least -15 mag (absolute) and many observers were temporarily blinded by it.

As usual with such a bright bolide event, there were a number of reports of strange sounds heard while the bolide was in view. At first I rather fashionably dismissed these as a psychological effect, until persuaded otherwise by some clear examples of sounds being noted prior to any visual acquisition of the bolide or its light.

At Rose Bay, Sydney, 20 km from the ground track of the bolide, S. McGrath "Heard a bang before seeing the light. It was like a person in the next apartment slamming a door like a screen door: rather rattley but not loud." This witness had time to get to a window and watch the bolide recede and disappear.

At Edgecliff, Sydney, 20 km from the ground track, A. Hayes "Heard a noise like an express train or bus travelling at high speed. Next an electrical crackling sound, then our backyard was as light as day."

At Vales Point, 40 km from the ground track, J. Ireland "Heard a sound like an approaching vehicle and saw a flash of light (from behind his right shoulder) as everything was lit up like daylight."

At Kotara, Newcastle, 40 km from the ground track, N. Jones heard a noise like a "phut" when the bolide flared, but "It was not loud enough to wake anyone." However a friend standing by the door on the other side of their car heard nothing.

Other impressions of the sound simultaneous with the sighting were "a loud swishing noise"; "a humming sound like a transformer or distant siren"; "like steam hissing out of a railway engine for a count of about ten"; "a swishing sound like the onset of an unexpected high wind"; and "a low moaning,

whooshing transcribable on a tape recorder." It is most unfortunate that a tape-recorder was not immediately available to the latter witness.

Publicity surrounding the 1978 bolide elicited recollections from witnesses of earlier bolides, who provided descriptions of simultaneous sounds quite similar to the above examples. It became clear to me that the psychological explanation was not realistic and a physical explanation had to be sought.

The Search for an Explanation of Electrophonic Sounds

Clearly, the transmission of energy from a bolide to the vicinity of an observer of electrophonic sounds must be by electromagnetic means. High electrostatic fields causing audible brush discharges may not be ruled out, but it is difficult for these alone to explain electrophonic sounds heard well over 100 km from the ground track of a bolide travelling at an altitude of only 30 or 40 km. Electrostatic fields produced by meteoroids entering the atmosphere vertically have been studied by Ivanov and Medvedev (1965) who showed that the induced potentials over distances of the order of the scale height may be several hundred volts for large meteoroids, hardly enough to cause electrophonic effects.

Sustained electrophonic sounds accompany bolides in trajectories having very small inclinations (Romig and Lamar, 1963) rather than very steep or vertical paths. In the latter case, sounds of an electrophonic nature are generally of very brief duration.

The work of Hawkins, already referred to, was widely considered to rule out the generation of electromagnetic radiation by meteors, at least at the frequencies examined. However it seemed to me entirely plausible that very large meteors which penetrate low into the atmosphere — bolides — could excite plasma oscillations not possible with the smaller bodies at higher altitude which were observed by Hawkins.

A literature search disclosed instances where bolides produced no electromagnetic radiation at frequencies in the broadcast band and above, up to at least the microwave region of the spectrum (Keay, 1980b). On the other hand, the acoustic effects suggest that the electromagnetic energy may lie within the audible range from 100 to 10,000 Hz, in which case no rectification is needed to detect the signals: simple transduction suffices. There exists no observational evidence ruling out em radiation at frequencies in the ELF/VLF range, so energy transfer in this region of the spectrum was accepted as a working hypothesis, with transduction to acoustic energy taking place close to or within the hearing organs of some observers (Keay, 1979). The response to this idea was mixed: a prominent meteor scientist dismissed it with the words, "Or is this a more fruitful field for psychologists rather than physicists?" (anon., 1979).

At this point, it should be noted that Romig and Lamar (1963) did suggest "that the sound is electrically transmitted and transduced near the observer." Equality of frequency was not implied because they elsewhere employed the

word transduction for examples where the em frequency did not lie in the audio frequency range. In a later paper, Romig and Lamar (1964) mentioned the possibility that "perhaps the electromagnetic waves act directly on the brain." But Lamar and Romig (1964) claimed (without references) that "There are also many individuals who report that the sounds seemed to have originated from surrounding objects rather than the fireball." Ingalls (1967) quotes a Cornell Radiophysicist, Dr. B. W. Hapke, who, with his wife, witnessed an electrophonic bolide. He stated, "The hissing and crackling noises were definitely associated with the meteor, although we cannot be sure whether or not they appeared to be coming from the meteor or from all around us."

Evidence for direct transduction of ELF/VLF em radiation into sound has been available from at least two sources. Lightning strokes emit em energy over a very broad spectrum and for many years instances of "vits," "clicks" (McAdie, 1928) "tearing noises" and "swishes" (Cave, 1926) preceding thunder have been reported. The latter are probably due to a rapid increase in the geoelectric field just prior to the discharge (Schonland, 1964), but the sharp sounds are usually coincident with the flash. Similar clicks are said to be heard at the instant of atmospheric nuclear weapon detonations from which the strong em pulse is well studied and known to peak at around 12 kHz (Johler and Morganstern, 1965).

The Electromagnetic Energy Generation Process

A large bolide sheds its kinetic energy at rates upwards of tens of gigawatts. Its luminous efficiency, a function of velocity and composition, is of the order of a few percent. Ionization is of the same order, while the remaining energy is mainly liberated as heat. The extremely high energy density residing in the plasma trail should excite all oscillatory modes possible, including those at frequencies in the audio range (ELF/VLF radiation). The problem is to discover a realistic generation mechanism. One possibility appeared to be through excitation of a hybrid-mode magnetohydrodynamic wave within the plasma of the bolide trail. For a typical ion density of 10^{23} m^{-3} at an altitude of 30 km, the plasma frequency is of the order of 10^{11} Hz, in the microwave region of the spectrum. Ion cyclotron oscillations in the Earth's magnetic field have a very low frequency, about 100 Hz, but they are prevented by the high collision frequency of at least 10^8 Hz.

Turning to the possibility of bulk oscillations in the trail plasma generating Alfvén waves, the collision frequency at the above altitude in a fully ionized plasma at a temperature of 5500° K is found to be $1.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$. This yields a conductivity

$$\sigma = \frac{e^2 n}{m_e v_c} = 7.5 \times 10^3 \text{ } \Omega \text{ m}^{-1} \quad (1)$$

Assuming an effective oscillating column length across the trail of 200 m, and taking, from the chosen altitude of 30 km, a typical value for the trail den-

sity of $2 \times 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$, the Lundquist number, which determines the likelihood of magnetohydrodynamic wave generation (Alfven and Falthammar, 1963), is

$$Lu = \frac{BL\sigma}{2\pi^2} \sqrt{\frac{\mu_o}{\rho_p}} \approx 0.25 \quad (2)$$

This is quite insufficient, as it needs to be much greater than unity.

In the search for other possible generation mechanisms the production of the pulse of electromagnetic radiation from a nuclear explosion was investigated. Of the principal mechanisms discussed by Price (1974), those involving X- and gamma-radiation may be ruled out for bolides. But the third mechanism, involving the expulsion of the geomagnetic field from the ionized region surrounding the bolide, bears examination.

The ratio of thermal to magnetic energy per unit volume in the plasma sheath of the bolide is given by

$$\frac{3\mu_o \rho_p RT}{B^2 M} \approx 1.3 \times 10^8 \quad (3)$$

where the molecular weight M is taken as the standard value of 29 and the strength of the geomagnetic field B is taken as 0.3 gamma ($3 \times 10^{-6} \text{ G}$). This indicates that the energy density in the sheath is 8 orders of magnitude greater than the geomagnetic field energy density and therefore the geomagnetic field is easily pushed aside by the bolide.

The geomagnetic field expelled from the plasma sheath surrounding a bolide leaks back into the trail plasma at a rate which may be estimated from skin depth considerations. It can be shown that the expelled field will penetrate the bolide trail plasma in a time no greater than

$$t_p = \frac{\mu_o \pi r_o^2}{2} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ s} \quad (4)$$

where r_o is the initial trail radius which is taken as 1 meter for a magnitude -16 bolide and total ionization is assumed as an upper limit. This result indicates that the geomagnetic field can be expelled only from the first few tens of meters of the bolide trail. The power radiated amounts to no more than $u_m A v$, where A is the cross-sectional area of the plasma and v is the bolide velocity. This yields less than 100 watts for a bolide of magnitude -16, a consequence of the trail expansion expending most of its energy doing work against the ambient air pressure rather than against the geomagnetic field. Clearly, the mechanisms which operate to produce VLF radiation from a nuclear fireball are unimportant for a meteor fireball unless it is of comparable size and energy.

As indicated, the initial expulsion of the geomagnetic field is very temporary and the field leaks back into the plasma only a short distance behind the bolide body during the brief interval before the onset of wake turbulence. The re-established field is then controlled by plasma motion provided the magnetic Reynolds number Re , is well above unity.

Assuming the initial scale size of the turbulence L_p is of the order of the size of the bolide itself, around 1 meter in diameter, the velocity of the turbulent motion v , is one tenth of the velocity of the bolide, and the conductivity has the value given above, the magnetic Reynolds number is

$$R_m = \mu_o L_p v_p \approx 20 \quad (5)$$

This value is adequate for the transfer of the abundant turbulent wake energy into magnetic field energy for as long as the electrical conductivity remains high.

The turbulent motions in the wake have characteristic frequencies upwards of $v_p/2\pi L_p$, around 500 Hz, as energy is transferred to smaller eddies. The turbulence excites vibrations of the geomagnetic field giving rise to the emission of electromagnetic radiation in the ELF/VLF region of the spectrum. A major release of stored magnetic energy occurs when the conductivity falls, due to recombination or electron attachment as the plasma cools and the magnetic Reynolds number falls to less than unity. The twisted and tangled "magnetic spaghetti" then relaxes, releasing its strain energy as vibrations of the geomagnetic field within the earth-ionosphere cavity. These field vibrations have wavelengths of the order of 100 km, corresponding to an electromagnetic wave frequency of 3 kHz.

The above mechanism for the generation of electromagnetic radiation from large bolides is in accord with the observational finding that only very large bolides give rise to reports of electrophonic sounds. Astopovich (1958) claimed that only those bolides having an absolute visual magnitude brighter than -9 produce sustained electrophonic sounds. This empirical criterion has since been upheld by model calculations (Keay, 1992a) based on the need for the bolide to penetrate the atmosphere deeply enough to produce a turbulent wake (see, for example, ReVelle, 1979) in order for geomagnetic field trapping and scrambling to occur.

Soon after the development of the above bolide radiation mechanism by the author (Keay, 1980b) it was confirmed by Bronshten (1983a and b), who showed that a typical electrophonic bolide of magnitude -13 could generate well over a megawatt of radio power in the ELF/VLF region of the spectrum.

Electrophonic sounds have been reported from bolides fainter than magnitude -9. The sounds are usually of brief duration coincident with flaring or an explosion. Under these circumstances the expansion of the plasma fireball, still travelling forward at high velocity, would create the turbulent conditions

necessary for the generation of radio waves. Japanese observers (Watanabe, Okada and Suzuki, 1988) have succeeded in photographing a large Perseid meteor (a borderline bolide) which exploded and produced an electrophonic "phut" sound, while simultaneously from two other locations radio records were obtained (see Keay, 1992c). This was a remarkable feat given the rarity and random incidence of electrophonic bolides which makes it very difficult to record their radio emissions.

Turning now to other electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight, Bronshten (1991) has conducted an exhaustive investigation of such effects, concluding that the problem is far from a solution. Many attempts have been made to investigate electric fields and currents in meteors and their trails without conclusive results. Claims that meteors can produce transient pulses in the geoelectric field (Hopwood, 1989) have not been independently verified.

The Electrophonic Sound Transduction Process

It is common knowledge that high electrostatic fields make dry hair stand on end. Human electrophonic hearing (the direct perception of electrostatic fields varying at audio frequencies) has been reported (Sommer and von Gierke, 1964) but the field strengths required are large: several kilovolts per meter. Tests undertaken in an anechoic chamber with 44 volunteers to check their response at frequencies of 1, 2, 4 and 8 kHz showed quite wide variability between subjects (Keay, 1980c). The findings of Sommer and von Gierke were confirmed for the least sensitive subjects. At the higher frequencies, 4 and 8 kHz, the greatest sensitivity was shown by three subjects (2 female) whose common characteristic was very loose or "frizzy" head hair. Their threshold peak-to-peak electric field strength was 160 V/m. Another subject (male) was found to be 3 to 4 db more sensitive at 2 and 4 kHz when wearing glasses.

These findings point towards external transduction near to the ears as being more effective than internal electrophonic hearing processes. This is borne out by Sommer and von Gierke's observation that it proved extremely difficult to eliminate direct acoustic radiation from the electrodes employed. This was also true in the above tests, which required acoustic insulation to suppress electrode sounds. Later it became clear that such electrically excited sounds were really those being sought! Interestingly, Ingalls (1967) alludes to the same problem in his similar tests, which "failed to produce effects which which could be attributed to other than normal aural paths from 20 to 20,000 Hz."

In the same anechoic chamber, tests were also conducted to check the ability of the volunteers to hear magnetic fields varying at audio frequencies. Up to peak magnetic fields approaching 0.1 mT (the maximum attainable with the equipment available) there was no significant response from any of the subjects.

Later, in another anechoic chamber, tests were conducted to test a number of mundane objects, including vegetation, for their ability to act as transducers

(Keay and Ostwald, 1991). Under electric fields of 400 kV m^{-1} peak-to-peak varying at 0.5, 1, 2 and 4 kHz, samples including aluminium cooking foil and typing paper produced sound levels in the 40 to 60 dB (SPL ref. 20 micronewton m^{-2}) range, while sprigs of casuarina pine and coastal myrtle produced from 10 to 25 dB (SPL). These represent minimal responses because the samples were not shaped or mounted in any special way to enhance their transduction ability. Of course, larger or more extensive amounts of the sample materials could be expected to produce similar sound levels at lower levels of electrical excitation. Furthermore, objects having resonant frequencies of vibration in the audio range would exhibit an enhanced response and color the sounds emitted.

From the above tests it is clear that for mundane objects, which may be close to observers of electrophonic fireballs, their transduction efficiencies may vary by ratios of more than 70 dB (power) accounting to some extent for the seemingly capricious incidence of reports of electrophonic sounds. This is borne out by the loudness range of witness reports, which span acoustic power levels (assuming the transduction occurs close to the observer) from as low as 20 dB (10^{-10} watt), "barely audible hissing" or "like a very faint sighing," to at least 80 or even 90 dB (10^{-3} watt). For example, from quite different locations, three independent witnesses of the 1986 fireball over the south-west region of Western Australia reported "a violent explosion," "very loud sounds" and "a roar" during the passage and about 90 seconds later all heard the sonic boom effects. A collection of over 100 electrophonic sound observations indicates that reports of faint sounds are far more common than loud sounds, suggesting that ambient noise levels mask electrophonic sounds in many instances.

Possibly Related Phenomena

Apart from the instantaneous sound occasionally heard to accompany a lightning stroke, as mentioned earlier, the phenomenon most obviously related to electrophonic sounds from bolides is the existence of many disjuncts of sounds from very bright aurorae. Although their existence is hotly disputed by many auroral scientists, accounts of such sounds date back at least one thousand years (Dall'Olmo, 1980). The whole subject of auroral sounds has been exhaustively investigated by Silverman and Tuan (1973) who conclude "that the observational evidence supports the reality of auroral sounds and that the most likely source of these seems to be brush discharges, and that these are generated by aurorally associated electric fields." This was also the conclusion of a life-long student of such sounds, the late Professor C.A. Chant of Toronto (Keay, 1990). Very large electric fields of the order of 10 kV per meter from intense aurorae have been measured (Olson, 1971) but the equipment he used may well have been unable to rule out a large audio-frequency component of the field. Sixty years ago, Burton and Boardman (1933) reported bursts of VLF emission accompanying flashes of auroral light and there have been many similar observations since then proving that the polar regions of the

Earth are at times a very strong radio source with power levels in the gigawatt region (Gurnett, 1974). Four possible generation mechanisms have been proposed (Gurnett, 1978) and the subject is far from resolved.

An intriguing phenomenon, which may also result in the direct transduction of ELF/VLF electromagnetic energy into sound, is the correlation often reported between strong radio emissions and subsequent earthquakes (Corliss, 1983). A number of reports mentioning a "rushing" sound preceding earthquake shocks were gathered by Milne (1841). More recent accounts of such sounds may be lacking because of greater incidence of similar man-made artifacts reducing public alertness to sounds of seismic origin. However, audio frequency electromagnetic disturbances associated with earthquakes have been discussed in this journal (Parrot, 1990), while laboratory studies mentioned by Johnston (1987), and others, show that rock fractures generate electromagnetic signals. Cress and his coworkers (1987) recorded signals peaking in the range from 900 Hz to 5 kHz. Field studies conducted by O'Keefe and Thiel (1991) during large rock-blasting operations revealed a series of electrical pulses with a repetition frequency as high as 5 kHz and an amplitude of several volts. The substantially greater energy release in an earthquake could be expected to generate signals many orders of magnitude higher in amplitude. The connection has yet to be confirmed between these experimental observations and the alarm frequently exhibited by animals immediately prior to an earthquake and, of course, the sparse reports of earthquake sounds by human observers.

Lastly, a phenomenon which is almost certainly identical to the subject of this essay, was first reported when NASA space shuttles began landing in Florida (Keay, 1985). J. Oberg and D. Potter of the Johnson Space Center began receiving reports of people hearing a "swishing" sound as the shuttles re-entered the atmosphere over northern Texas and Oklahoma. Several attempts to record the sounds and the radio signals were thwarted by mission changes and the Challenger disaster. This quest has not yet succeeded, though the relative predictability of space shuttle re-entries makes the deployment of recording equipment more likely to be rewarded than for random bolide events. The destructive re-entry of large rocket stages also may produce electrophonic sounds: such a report was forthcoming from one of the witnesses (D. Deane of Townsville, QLD) to such an event over north Queensland on the early morning of 31 July 1992, when the Cosmos 2204 rocket reentered the atmosphere.

Conclusions

Physically acceptable explanations have now been found for each stage of the transfer of energy at luminal speed from a bolide to the ears of a witness. The explanations are, as yet, far from exhaustive, and there is ample scope for

further investigations. In particular, there is need for a comprehensive treatment of the "magnetic spaghetti" radio generation mechanism taking turbulent plasma processes fully into account, and a need for thorough analysis of the acoustic response of mundane physical objects to impressed electrical stress.

The collection of high-quality observational data is an important priority. The difficulties of capturing records of bolide events are quite formidable given their rarity. Also important for correlation with synoptic ELF/VLF records are catalogs of electrophonic observations for which the times should be as accurate as possible. This has long been recognized by Russian meteor scientists who have now published five catalogs containing over 600 observations of electrophonic bolides (Bronshten, 1991). The only such catalog of Western origin is contained in Romig and Lamar's (1963) comprehensive study, although a new catalog containing more than one hundred entries has been assembled and is shortly to be published by the author in the WGN Report series of the International Meteor organization (Heerbaan 74, B-2530 Boechout, Belgium).

A limited search, with negative results, was conducted by Wang, Tuan and Silverman (1984) using data collected from a VLF monitoring station at Thule, Greenland. The distances from the bolide events were large and the frequencies examined were probably too high. There is a pressing need for better radio observations of bolides known to have been associated with confirmed reports of electrophonic sounds.

Lastly, it is essential for geo-scientists to take reports of audible phenomena more seriously in order that some progress can be made in identifying the physical mechanisms involved. The subject of electrophonic sounds from bolides is now considered respectable within the meteor science community (Keay, 1992b), and a similar shift in acceptance is now overdue within the communities of auroral and seismic scientists.

Acknowledgements

I should like to thank Bruce McIntosh, Ottawa; Doug ReVelle, De Kalb; Bill Jones, Sheffield; Vitaly Bronshten, Moscow; and Bill Napier, Edinburgh, for helpful discussions at various stages of the development of this research; also Ian Halliday, Ottawa, and Zdenek Cepelcha, Ondrejov, for supplying valuable meteor fireball data. Thanks are also due to the University of Newcastle for grants subsidizing my attendances at conferences and meetings at which many of the important seminal arguments took place. In particular, I should like to express my gratitude to the Herzberg Institute of Astrophysics of the Canadian National Research Council in Ottawa, whose hospitality and splendid library facilities enabled real progress to be made on the problem at a time when it was widely considered to be completely intractable. And I thank the Geophysical Committee of the former Soviet Academy of Science for their unstinting generosity and encouragement.

References

- Adrian, D. J. (1977). Auditory and visual sensations stimulated by low-frequency electric currents. In *Biological Effects of Electromagnetic Waves*. Am. Geophys. Union, D. R. Justesen & A.W. Guy (eds.), 243-250.
- Alfven, H. and Falthammar, C. G. (1963). *Cosmical electrodynamics*. Oxford, Clarendon Press (2nd edition).
- Anon. (1979). "Meteore" No. 9, I.A.U. 17th General Assembly, Montreal.
- Anyzeski, V. (1946). Speculations regarding ethereal sound from bolides. *Popular Astronomy*, 54, 433-435.
- Astapovich, I. S. (1951). Acoustical phenomena occurring simultaneously with the flight of bolides. *Meteoritika*, 9, 71-101.
- Astapovich, I. S. (1958). Meteoric phenomena in the earth's atmosphere. *Fizmatgiz*, Moscow (in Russian).
- Barringer, B. & Hart, H. C. (1949). The mechanism of the sounds from meteors. *Popular Astronomy*, 57, 507-512.
- Beech, M. (1989). The great meteor of 18th August 1783. *Jour. Brit. Astron. Assoc.*, 99, 130-134.
- Beech, M. (1990). William Frederick Denning: In quest of meteors. *Jour. Roy. Astron. Soc. Canada*, 84, 383-396.
- Blagdon, C. (1784). An account of some late fiery meteors; with observations. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 74, 201-232.
- Bronshnten, V. A. (1983a). A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Astronomicheskii Vestnik*, 17, 94-98; English trans: *Solar System Research*, 17, 70-74.
- Bronshnten, V. A. (1983b). *Physics of meteoric phenomena*. Dordrecht, Reidel Publishing Company.
- Bronshnten, V. A. (1991). Electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight. *Astronomicheskii Vestnik*, 25, 131-144; English trans: *Solar System Research*, 25, 93-104.
- Burton, E. T. & Boardman, E. M. (1933). Audio-frequency atmospherics. *Proc. I.R.E.*, 21, 1476-1494.
- Cave, C. J. P. (1926). The sound of lightning. *Nature*, 116, 98.
- Corliss, W. R. (1983). Earthquakes, tides, unidentified sounds and related phenomena. *The Sourcebook Project*, Glen Arm, MD 21057, 94-96.
- Cress, G. O., Brady, B. T., & Rowell, G. A. (1987). Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory. *Geophys. Res. Lett.*, 14, 331-334.
- Dall'Olmo, U. (1980). Latin terminology relating to aurorae, comets, meteors and novae. *J. Hist. Astron.*, 11, 10-27.
- Derham, W. (1727). Observations on the Lumen Boreal, or streaming on Oct. 8 1726. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 34, 245-252.
- Denning, W. F. (1903). On the sounds alleged to precede or accompany the flights of meteors. *Jour. Brit. Astron. Assoc.*, 13, 277-279.
- Denning, W. F. (1907). Audible meteors. *Symons's Meteorological Magazine*, 42, 10-11.
- Denning, W. F. (1915). Sounds accompanying aurorae? *Jour. Roy. Astron. Soc. Canada*, 9, 199-200.
- Gurnett, D. A. (1974). The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation. *J. Geophys. Res.*, 79, 4227-4238.
- Gurnett, D. A. (1978). Electromagnetic plasma wave emissions from the auroral field Lines. *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 257-272.
- Halley, E. (1719). An account of the extraordinary meteor seen all over England, on the 19th of March 1719. With a demonstration of the uncommon height thereof. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 30, 978-990.
- Hawkins, G. S. (1958a). Radio noise from meteors. *Nature*, 181, 1610.
- Hawkins, G. S. (1958b). A search for radio emission from meteors. *Astrophys. J.*, 128, 724-726.
- Hopwood, A. (1989). A new meteor logging technique. *Electronics and Wireless World*, 95, 540-542.
- Ingalls, C. E. (1967). Sensation of hearing in electromagnetic fields. *New York State J. Med.*, 67, 2992-2997.
- Ivanov, V. V. & Medvedev, Yu. A. (1965). Electric effect of large meteoroids. *Geomagnetism and Aeronomy (USA)*, 5, 216-219.

- Johler, J. R. & Morganstern, J. C. (1965). Propagation of the ground wave electromagnetic signal, with particular reference to a pulse of nuclear origin. *Proc. I.E.E.E.*, 53,2043-2053.
- Johnston, M. J. S. (1987). Tectonomagnetism and tectonoelectricity. *Rev. Geophys.*, 25,983-988.
- Keay, C. S. L. (1979). Reports of anomalous sounds from a large fireball. Unpublished scientific paper presented to Commission 22 at the 17th General Assembly of the I. A. U., Montreal.
- Keay, C. S. L. (1980a). The 1978 New South Wales fireball. *Nature*, 285,464-466.
- Keay, C. S. L. (1980b). Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*, 210, 11-15.
- Keay, C. S. L. (1980c). Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 74,253-260.
- Keay, C. S. L. (1985). In quest of meteor sounds. *Sky and Telescope*, 70,623-625.
- Keay, C. S. L. (1990). C. A. Chant and the mystery of auroral sounds. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 84,373-382.
- Keay, C. S. L. (1992a). Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics*, 27,144-148.
- Keay, C. S. L. (1992b). Physics, psychology and respectability. *Scientometrics*, 23,355-359.
- Keay, C. S. L. (1992c). Meteor fireball sounds identified. In *Asteroids, comets, meteors 1991*, A. W. Harris and E. Bowles (eds.), Lunar and Planetary Institute, Houston TX, 297-300.
- Keay, C. S. L. & Ostwald, P. M. (1991). A laboratory test of the production of electrophonic sounds. *J. Acous. Soc. Am.*, 89, 1823-1824.
- Lamar, D. L. & Romig, M. F. (1964). Anomalous sounds and electromagnetic effects associated with fireball entry. *Meteoritics*, 2, 127-136.
- LaPaz, L. (1958). The effects of meteorites upon the earth. *Adv. Geophys.*, 4,217-350.
- McAdie, A. (1928). Phenomena preceding lightning. *Monthly Weather Review*, 56,219-220.
- Milne, D. (1841). Notices of earthquake-shocks felt in Great Britain, and especially in Scotland, with inferences suggested by these notices as to the causes of such shocks. *Edinburgh New Philos. J.*, 31, 92-122.
- Nininger, H. H. (1934). The great meteor of March 24, 1933. *Popular Astronomy*, 42, 291-306.
- Nininger, H. H. (1939). Sound from ether waves? *Popular Astronomy*, 47, 97-99.
- O'Keefe, S. G. & Thiel, D. V. (1991). Electromagnetic emissions during rock blasting. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 889-892.
- Olmsted, D. (1834, 1835). Observations on the meteors of November 13th, 1833. *Am. J. Sci.*, Series 1, 25, 363-411, continued in 26, 132-174.
- Olson, D. E. (1971). The evidence for auroral effects on atmospheric electricity. *Pure and Appl. Geophys.*, 84, 118-138.
- Parrot, M. (1990). Electromagnetic disturbances associated with earthquakes: An analysis of ground-based and satellite data. *J. of Scientific Exploration*, 4,203-211.
- Price, G. H. (1974). The electromagnetic pulse from nuclear explosions. *Rev. Geophys. Space Phys.* 12,389-400.
- Pringle, J. (1759). Several accounts of the fiery meteor, which appeared on Sunday the 26th of November, 1758, between eight and nine at night. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 51, 218-259 and some remarks, *ibid.* 259-274.
- ReVelle, D. O. (1979). A quasi-simple ablation model for large meteorite entry: theory vs. observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 41,453-473.
- Romig, M. F. & Lamar, D. L. (1963). Anomalous sounds and electromagnetic effects associated with fireball entry. *RAND Memo.* RM-3724-ARPA.
- Romig, M. F. & Lamar, D. L. (1964). Strange sounds from the sky. *Sky and Telescope*, 28, 214-215.
- Schonland, B. (1964). *The flight of thunderbolts*. Oxford, Clarendon Press.
- Sexton, S. (1885). The value of the testimony to the aurora sound. *Nature*, 32,625-626.
- Short, T. (1740). An account of several meteors. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 41,625-630.
- Silverman, S. M. & Tuan, T. F. (1973). Auroral audibility. *Adv. Geophys.*, 16, 155-259.
- Sommer, H. C. & von Gierke, H. E. (1964). Hearing sensations in electric fields. *Aerosp. Med.*, 35, 834-839.
- Udden, J. A. (1917a). The Texas meteor of October 1, 1917. *Univ. Texas Bulletin, No. 1772*, 45-47.
- Udden, J. A. (1917b). A Texas meteor. *Science*, 46,616-617.
- Walker, P. M. B. (ed.) (1988). *Chambers Science and Technology Dictionary*. Cambridge, W & R Chambers Ltd and Cambridge University Press.
- Wang, D. Y., Tuan, T. F., & Silverman, S. M. (1984). A note on anomalous sounds from meteor fireballs and aurorae. *J. Roy. Astron. Soc., Canada*, 78, 145-150.

- Watanabe, T., Okada, T., & Suzuki, K. (1988). Meteor and radio wave. *HAM Journal (Japan)*, 54, 109-115 (in Japanese).
- Wylie, C. C. (1929). The meteor of July 25, 1929. *Popular Astronomy*, 37, 514-519.
- Wylie, C. C. (1932). Sounds from meteors. *Popular Astronomy*, 40, 289-294.
- Wylie, C. C. (1939). Psychological errors in meteor work. *Popular Astronomy*, 47, 289-294.