

201210-12 宇宙線百年

宇宙線発見百年

**仁科記念講演会「宇宙線発見100周年」**

主催：公益財団法人 仁科記念財団 共催：東京大学宇宙線研究所  
後援：公益社団法人 日本アイソトープ協会

挨拶  
仁科記念財団理事長  
**小林 誠**

甲南大学教授  
**佐藤 文隆**

講演1 **「宇宙線の発見まで」**  
東京大学宇宙線研究所教授  
**梶田 隆章**

講演2 **「宇宙線発見から  
100年経って」**

▲ 仁科研究室で撮影した  
宇宙線ミュオンの飛跡, 1937年  
この写真によりミュオンの質量が決定された

日時  
2012年12月6日(木) 15:00 ~ 17:00  
(14:30より開室します)

場所  
東京大学理学部一号館 小柴ホール (左の地図をご覧ください)

問い合わせ先: 東京大学宇宙線研究所担当者 (nkl-2012@icrr.u-tokyo.ac.jp)



気球でイオン濃度測定

2012年は宇宙線が発見されて百年目に当たり、世界中でいろんな行事も行われた。上の図もその一つである。百年目といっても、落し物を拾うように、ある日

突然、発見された訳でないから、発見年の特定は自明ではない。今年が百年目だという時には、1912年にオーストリアのヘス (Victor F. Hess, 1883-1964) という人が、自身が気球に乗り込んだ観測で、「ある高さ以上に登ると大気中のイオン濃度がだんだん上昇している」事実を発見したことを指している。彼はこの発見で1936年のノーベル物理学賞を受賞している。気球による観測は1911年秋から1912年の夏にかけて10回行っており、学会発表や論文の発表が1912年の秋ということである。

### 逃電現象

この発見物語の芽は十九世紀中頃に電気の実験が始まった当初からあった。摩擦で静電気を起こして貯めておこうとしても、時間が立つと何時の間にか静電気は無くなってしまう。これは逃電現象などと呼ばれた。何処かに逃げて行くのである。初めは支えている棒を伝って逃げるのかも知れないと考え、支えの棒の絶縁をよくして逃げられない様にする改良をしたが、やっぱり逃げて行く。そこでいろいろ調べた結果、空気中に漂うイオンと静電気の電荷が中和して無くなる事がわかった。すなわち空気は完全な絶縁体でなく、イオンがわずかにあり、伝導性を持つということで、大気伝導性と言われることもある。この課題は今でも雷や大気のエアロゾル（チリ）などの気象現象とも関係したホットな話題である。

### 放射線の発見

それはともかくとして、問題は「空気中に存在するイオンの起源は何か？」に移った。十九世紀末、X線と放射線が発見され、こういう放射線が物質をイオン化する能力をもつ事が分かった。空気中のイオンの存在もこれで説明できた。土壌にはいろんな放射性の元素が含まれており、それらが出す放射線で絶えずイオン化が起こっている。生成された正負のイオンは再び引き合って中和する。放射線による生成と中和による消滅がバランスするイオン量だけ存在するのである。

## 測定装置の改良

これで逃電現象の原因は空気中のイオンであり、原因物質は土壌中の放射性物質であることが分かった。したがって、上空に行き土壌から遠ざかれば、イオンは少なくなるはずである。途中の空気に吸収されて上空まで達する放射線は少なくなるのである。この予想を確かめる為に、1907年にはエッフェル塔に登って測る人も現れた。また気球に乗って上空でのイオン量を測る試みも始まった。ここで「上空」とは土壌から離れることだから、海拔の高い高地に行ってもダメである。

こうした野外での測定には従来の実験室で使用している機器ではダメで、携帯用の検電器の開発も必要だった。また、バラバラな手づくりの測定機器では観測結果の比較が難しい。放射線測定の基準作りも必要であった。実は長年こういう測定技術の改良をやって来たウーン大学のエクスナーやマイヤーといった先輩達の成果を受け継いで、若いヘスによる発見があったのである。



図1 気球で上空に向かう ヘスは左から二人目(PhysORGのHPより転載)

## ヘスの大冒険

この様に、気球での測定という試みはヘスが最初ではないが、彼の強みは最終的には五千メートル以上までにも達する観測をしたことである。気球でそんな高度に行くのは当時は命がけである。この勇気ある冒険でノーベル賞を勝ち取ったとも言える。1883年生まれ、ヘスは当時まだ29才の青年である。この観測の結果は予想に反して、上空に行けばイオン量は増加することがわかった。すなわち、大気の外からも放射線は吹き込んでいたのである。もっと細かくいうと、地上から2千メートルぐらい迄は予想通りイオン量は減少するが、さらに上空にいくとイオン量は増加し、6千メートルでは地上の10倍にもなるのである。

正確にいうと、イオンの量は地球上どこでも同じではなく、地磁気の緯度の差で違っている。実際、ヘスの発見が話題になって数年して、アメリカのテキサス州で観測した結果、上空でのイオン量はヘスが言うようには増えていないことも分かった。しかし、これはヘスの発見が間違いだと言うことではなく、宇宙からやって来る放射線は、地磁気の影響を受ける。電荷を持つ粒子であることの新たな発見につながって行くのである。

## 宇宙からの放射線

冬場の乾燥した朝などには、金属の取手に触れるとビリッと感電する。この原因は空気中に漂うイオンであらう。この空気中のイオン濃度が数千メートル以上に行くとどんどん増加することが1912年にヘスによって発見され、イオン化能力を持った放射線源が上空に存在することが明らかになった。翌年、ヘスと同じ気球による観測で、コールヘスターがこれを確認した。しかし、その後しばらく、ヨーロッパで第一次大戦が勃発したから、大きな展開はなかった。そして、大戦後の1920年代に入ると、この発見は二十世紀の様々な物理学を生み出す震源地として大きく歩み出すのである。

## 宇宙線発見がもたらした影響

この連載は天文学に関心のある読者を想定しているので、その視点もふくめて宇宙線の発見が今日の科学に与えた影響を予め概観しておく。

1920- 地磁気の影響を受ける荷電粒子が宇宙空間から入射、太陽活動との相関  
1930- 陽電子や硬成分であるミュー中間子の発見、電磁シャワー、素粒子物理誕生

1955- 一次宇宙線の元素成分観測、宇宙線への加速理論、超新星起源、太陽風

1970- X線やガンマ線をだす天体の観測、高エネルギー天文学

1990- 気候変動と地球電磁気

現在、素粒子物理学というと、大型加速器で数百人がチームを組んでやる巨大なプロジェクトを想像しますが、こういう姿になったのは1950年代からである。

1930年代からこの時期まで、陽電子、ミュー中間子、パイ中間子を発見して、素粒子物理学の誕生を告げたのは野外での宇宙線観測であった。宇宙線から加速器へ転換できたのは、第二次大戦で核物理学の社会的実力が増して、巨額の資金を投入出来る様になったからである。

研究の中心はアメリカへ

ヘスもコールヘスターもドイツ語圏の科学者であり、何れも第一次大戦での敗戦国である。戦後しばらく、そこでの研究活動は停滞し、研究の中心は科学では新興国であったアメリカへ移行した。また1920年代末になると、やはり戦勝国であった日本も第一線に参入した。戦争であまり傷つかずに戦勝国となった日米には元気があったのである。既にノーベル賞受賞者であるアメリカの大物の実験物理学者であるミリカンとコンプトンが旗を振って、その若い研究者が一斉に動き出した。宇宙線というネーミングもミリカンによるものだ。

一次宇宙線と二次宇宙線

地上までの大気の厚い物質層を通過するのだから、はじめは宇宙から入射するのはガンマ線だと考えられた。しかし、赤道地帯から欧州までの航海での連続観測によって緯度によって強度が異なることが発見され、バラルタなどの地磁気での荷電粒子運動理論の結果と合わせて、入射するのは陽子であるとする説が有力となった。太陽でフレアが起こった時には、地磁気などと一緒に、宇宙線の強度も変化した。地球の上層に入射するのは陽子らしいが、地上で観測されるのは陽子ではない。入射する一次宇宙線が大気中の素粒子反応を経過して二次的に作られた二次宇宙線になると考えられた。すなわち二次宇宙線の起源を解明することは素粒子反応を解明することとなったのである。

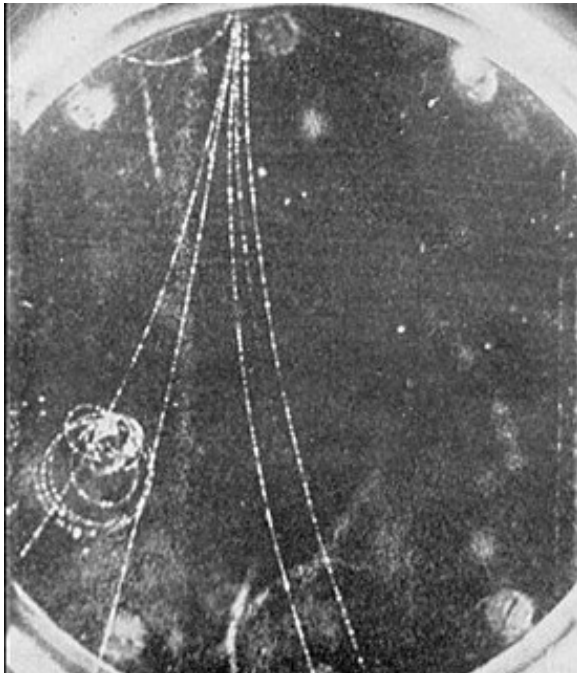
中間子の発見

二次宇宙線の研究を引っ張ったのは霧箱やガイガー管などの放射線測定技術の向上であった。特に、磁場をかけた霧箱での素粒子飛跡の写真からは素粒子の電荷と質量を測れるので、まず、デイラックの予言した陽電子が発見された。図2は霧箱での飛跡写真の例である。上から入射したガンマ線が電子対を発生した飛跡である。ここにはエネルギーの違う対発生が二例写っている。

1937年、この霧箱で次に発見された新素粒子が、電子と陽子の中間の質量を持つ、中間子である。この質量の新粒子をじつは湯川秀樹が1935年に理論的に提案していました。この時見つかったのは湯川粒子と違うものであることはすぐ分かり、

逆に未知の素粒子がまだ一杯あることを示唆した。何れにせよ、この時点でユカワの名は世界中に知れ渡ったのである。ユカワ粒子自体は第二次大戦直後に宇宙線で発見され、1949年の日本人初のノーベル賞につながったのである。宇宙線からはさらにK中間子、ラムダが発見され、加速器実験にバトンタッチされた。

図2：霧箱での素粒子の飛跡。今は理科実験で簡単に見ることができる。



素粒子実験は加速器へ

第二次世界大戦中の軍事技術は戦後の科学界にも大きな影響を及ぼした。特に大きかったのは原爆とレーダーの影響である。原子核と素粒子の研究にはそれまでと桁違いの研究費が使える様になり、次々と大きな加速器が建設された。それまで宇宙線という滅多に受からない高エネルギー粒子を用いた素粒子実験は加速器での大流量のビームを使って短時間で行えるようになり、1950年代後半から新しい素粒子が次々と発見された。それから20年あまりの間に三世代のクオーク・レプトンが出揃った。一方、この加速器巨大化のかげで、宇宙線は素粒子研究から退場していった。

レーダーから電波天文

戦時下の空爆に関係して俄かに開発されたレーダー技術は、戦後、通信と電波天文学に受け継がれた。宇宙電波の観測で銀河円盤に沿った背景電波や電波源天体の放射メカニズムがシンクロとロン放射であることが発見された。これはそこに高エネルギー電子と磁場が存在することの発見である。偏光観測でカニ星雲の可視光もシンクロトロン光であることが分かった。宇宙線の様な高エネルギー粒子が関与している宇宙現象も見つかった。こうして大戦前の素粒子反応実験の手段としての宇宙線から、宇宙現象の一環としての宇宙線という見方に関心が移っていったのである。

### 宇宙線の起源

1960年に私が大学院に入った頃は正にこうした宇宙線の転換期であった。その頃のもう一つの動きはロケットや人工衛星によるスペースサイエンスの急発進である。また大型の観測気球も登場した。強い放射線が蓄積されているヴァンアレン帯の発見が大きな話題だった。太陽活動や上空の磁気圏での高エネルギー粒子の発生が確認され、また、地球大気に入射する前の一次宇宙線には重い元素も含まれていることも明らかになった。このことは、宇宙線が宇宙誕生時の残存物とかではなく、通常の宇宙物質の一部が加速されたものであることを意味していた。こうして、イオン化したプラズマの運動によって、一部の粒子が加速される理論の研究が始まった。磁場を含むプラズマの運動で加速が起こる。1960年頃はまた核融合の夢が盛んな頃で、スペースサイエンスと核融合、両方の基礎として私はプラズマ物理を勉強し、粒子加速の理論をテーマに修士論文を書いた。

### 活動的天体と宇宙線の関連？

1963年頃から、電波天文の観測でクエーサー、パルサーなどの活動天体が発見され、後にブラックホールや中性子星であることがわかった。これは全てシンクロトロン放射で光っており、大量の高エネルギーの電子がそこに存在するのだ。活動天体は天然の巨大な加速器であるが、宇宙線の組成は陽子や原子核であり電子で

はない。両者の関係が問題になる。地球で観測されている宇宙線は数少ない目立つ変わり者の活動天体が源なのか？ それとも見た目には地味なより普通のプロセスか？ である。

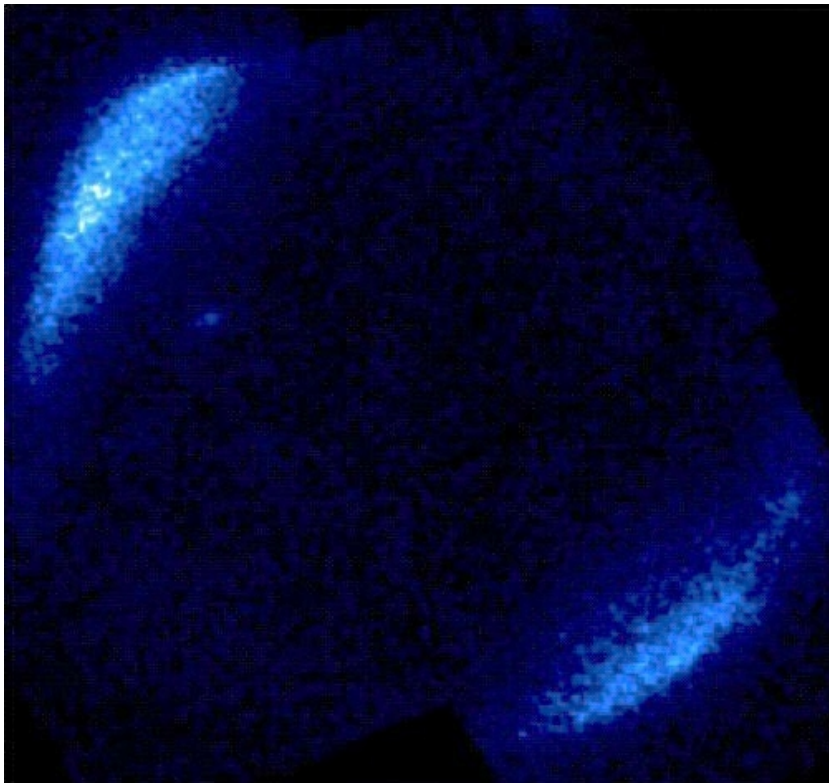


図3： 超新星 SN1006 の残骸の周辺が X 線のシンクロトロン放射で光っている。

#### 低エネルギー宇宙線の衝撃波加速

現在、宇宙線の加速は超新星爆発で飛び散った物質が突き進んでいく星間空間で起こっていることが明確になった。日本の X 線観測衛星すざくの成果のひとつである。図3の様に超新星 SN1006 の残骸の外側の球殻が X 線のシンクロトロン放射で光っていることを発見したのである。京大の小山勝二たちの成果であった。膨張する物質の前にできる衝撃波によって粒子加速が起こることは太陽現象でも検証されており、プラズマの理論でも確立しているので、これで実験と理論が一致したことになる。



この場合は電子も多く加速されてシンクロトロン放射で光っているが、これほど強力でなく、光った天体としては見えないが、陽子や原子核を静かに加速している領域が宇宙にはありふれてあるのかも知れない。

#### 宇宙線の閉じ込め

宇宙線は荷電粒子なので磁場によって進行方向が曲げられる。一方、銀河系の中には磁場が存在するので宇宙線は銀河系の中に閉じ込められるので、光の様に真っ直ぐ抜けていくのに比べて長い時間、銀河系の中に閉じ込められる。光だと数万年なのだが、数千万年ぐらいに長くなる。このために、銀河系の中でのエネルギー密度は星からの光と宇宙線とで同程度なのだが、発生率は千分の一で済むことになる。

磁場による閉じ込めの時間は粒子のエネルギーによる。エネルギーが大きいと閉じ込めが短い。だから、エネルギー毎に見ていかねばならない。流量（一秒間に単位面積を通過する粒子の数）はエネルギー $E$ とともに $E^{1.5}$ に逆比例して小さくなるが、最高エネルギーは人工加速器で達成できるエネルギーよりは遥かに大きい。今でも宇宙でしか起こっていない素粒子反応があるのである。