

## 連載

## 相対論百年【5】

## 光電効果理論も百年

綾仁 一哉（美星天文台）

## 1. 相対論だけではない

今年、アインシュタインが特殊相対性理論を発表してからちょうど100年ということで、この連載も「相対論百年」と題されています。アインシュタインと言えば相対論と、オウム返しのように答えてしまうぐらい、相対論以外のアインシュタインの研究業績については一般にはあまり知られていないでしょう。しかし、アインシュタインの1905年の業績は相対論だけではありません。光量子説に基づく光電効果の理論、ブラウン運動の理論という2つの重要な理論を発表し、特殊相対性理論と共に、この年のアインシュタインの3大発見と呼ばれています。いずれも、20世紀の物理学を切り開いたような業績で、だからこそ、1905年が奇跡の年と呼ばれ、100周年を記念して、今年の世界物理年とすることが昨年、国連総会で採択・宣言され、世界各地で記念行事が組まれているのです。

1915年から1916年に、一般相対性理論を完成させたアインシュタインは、1921年にノーベル賞を受賞しました。しかし、受賞理由は相対論ではなく、「理論物理学の諸研究、とくに光電効果の法則の発見」でした。一説によると、ノーベル賞は、実用的な発見に与えられるもので、相対論は対象と見なされなかったとも言われています。しかし、ノーベル委員会の報告書を調べたA. パイスによると、アインシュタインは相対論の業績を理由に何度もノーベル賞に推薦され続けていましたが、評価を任されたノーベル委員会の委員がたまたま相対論に批判的で、相対論がまだ検証不十分であると見なしていたために、結局は光

電効果が理由になったようです[1]。では、光量子説に基づく光電効果の理論はすぐに評価されたかといえば、発表当初はむしろ相対論以上に猛反発を食らったのです[1][2]。

宇宙膨張、ブラックホールなど、天文学の話題でも相対論は花形ですが、天文観測の現場では、光電効果こそが観測技術を支えていることも、後の章で述べます。

## 2. 光電効果と光量子論

## 2.1. 光電効果とは

一般的に、光電効果とは、物質が光を吸収して光電子が生じる現象のことです。その現れ方はいろいろあって、岩波の『理化学事典』では次のように分類されています。

## ・外部光電効果

金属などの固体表面から自由電子が放出されるもの

## ・内部光電効果

固体内部の伝導電子数が増加するもの

## ・光電離(光イオン化)

原子や分子に束縛された電子が自由電子になって放出されるもの

単に光電効果と言えば、これらのうちの外部光電効果を指すことが多く、高校物理の教科書でも外部光電効果の例だけをあげていると思いますが、他の2種類も天文では重要であるので、本稿の後半では、広い意味での光電効果の応用について取り上げることにします。

## 2.2. 光電効果の発見

外部光電効果を実験的に発見したのは、振

動数の単位にもなっているドイツの物理学者ヘルツ(H. R. Hertz)です。1887年、ヘルツは電気振動の実験で放電火花を起こしていましたが、火花が飛ぶ側に紫外線を当てると火花がより容易に飛ぶことに気がつきました。しかしそのことは実験の主目的ではなかつたので、それ以上の追求はしなかつたのです。当時はまだ電子すら発見されていませんでした。それでも多くの研究者の関心呼び、1888年にはハルヴァックス(W. Hallwachs)が負に帯電した金属に紫外線を照射すると電荷が無くなることを見いだしました。

一方、陰極線の研究も進み、1895年にはフランスのペラン(J-B Perrin)は陰極線が負の電荷を持った微粒子であること示し、1897年にはイギリスのトムソン(J. J. Thomson)がその粒子の比電荷( $e/m$ )を求め、粒子を電子と呼びました。

1899年、ドイツのレーナルト(P. E. A. Lenard)は紫外線を照射した金属から飛び出してくる微粒子もまたトムソンの電子と同じ比電荷を持つことを発見し、この微粒子も電子であることを示しました。さらに1902年にはこの実験を発展させ、飛び出した電子の最大運動エネルギーが照射光の強さには無関係で、照射光の振動数と関係があること、飛び出した電子の数は照射光の強さに比例することを発見しました。

このような状況で、アインシュタインの1905年の論文が出たわけです。

### 2.3. アインシュタインの光量子論に基づく光電効果理論

アインシュタインが1905年の論文で議論したのは、外部光電効果です。この論文で、彼はまず、光がエネルギー量子(光量子)から成るという仮説を提案し、これに基づいて、光電効果を議論しました。

光が粒子であるという説は、アインシュタ

インよりも遙かに早く、ニュートンが18世紀初めに述べています。しかし、回折・干渉など、波動説でなければ説明できない現象の発見により、粒子説は否定されたように見えました。しかし光電効果の発見はアインシュタインを新たな仮説に導きました。

彼は、光の波動論が、光の回折、反射、屈折などの「純粋に光学的な諸現象の表現についてはみごとにその正当さを立証して」いると述べた上で、

-----

「黒体輻射」、光ルミネセンス、紫外線による陰極線発生、そのほか光の発生や変脱(変換)に関連する一群の現象についての所見は、光のエネルギーが不連続的に空間へ配分されているという仮定によってこそ、より正しく解釈されるように見える --- これは筆者にとって今や実感である。

-----

と書き、光のエネルギーは、空間的に局在した有限個のエネルギー量子から成り立つという仮説を述べています。

そして具体的に、光のエントロピーと気体分子のエントロピーの比較の議論を経て、光が大きさ  $h\nu$  のエネルギー量子(光量子)から成り立つというアイデアに到達しています。

さらに、光の波動論が「光電現象を説明するための研究に際して、とりわけ重大な困難に出会った」と述べ、光電効果は、光のエネルギー量子が物体表面に入り込んで、その一部が電子の運動エネルギーに変わったものとし、最も簡単な描像として、1つの光量子がその全エネルギーを1つの電子に与える状況を仮定しました。

ここで彼が与えた光電効果の式を現代流に書くと、振動数  $\nu$  の光子1個が金属表面に当たったときに飛び出してくる電子の運動エネルギーの最大値を  $E_{\max}$  と書くと

$$E_{\max} = h\nu - W \quad (1)$$

( $h$ : プランク定数)

になるというもので、 $W$ は電子が物体を離れるときにする仕事(仕事関数)です。

(1)式は、電子の運動エネルギーの最大値が照射される光の周波数の1次関数になること、そして、 $h\nu_0 = W$ となる $\nu_0$ より小さい周波数の光を照射しても電子が飛び出さないことを表しています。しかし、これら2つの性質は、1905年時点ではまだ実験的に確かめられておらず(レーナルトも比例関係までは見いだしていなかった)、アインシュタインがこの論文で初めて予言したことになります。

しかし、アインシュタインの光量子論は、他の物理学者の強い拒否反応にあって、なかなか認められませんでした。それほど光の波動論は絶対的であったのです。特に、光の回折・干渉の現象は、光量子論には不利でした。1911年には波動論の立場から、共鳴によって電子が飛び出すという説が提案され、著名な物理学者はみなそちらを支持していました。

1905年の論文から約10年経過した1916年、ミリカン(R. A. Millikan)は種々のアルカリ金属に対する光電効果の精巧な実験により、アインシュタインの(1)式が非常に良く成立することを示し、プランク定数を0.5%の精度で求めました。ミリカンは、油滴法により電子の電荷を初めて求めたことで有名ですね。これでアインシュタインの光電効果の式(1)は信頼できるものとなりました。しかし、その基礎とされた光の粒子性については、1923年のコンプトン効果の発見までは学界に受け入れられなかったのです。

なお、アインシュタインが光子のエネルギーを $h\nu$ と与えたのは、1905年でしたが、もう一つ教科書に出てくる光子の運動量 $h\nu/c$ について述べたのは、それから12年も経った1917年の論文が初めてでした。光子(photon)という用語が使われるようになったのは1926年以降であり、それまでは光量子

と呼ばれていました。光が粒子性を持つことをはっきり主張する用語が使われるようになるまで、1905年から20年もかかったのです。

さて、光量子論で、量子力学への扉を開いたアインシュタインですが、その後、量子力学構築の中心になったボーアやハイゼンベルクと論敵の関係になったことは、「神はサイコロをふらない」という言葉と共に有名ですね。しかし、量子力学の重要性を認めなかったわけではありません。実際、彼は1928年、ノーベル委員会に量子力学の創始者であるシュレディンガーとハイゼンベルクを推薦しています。

### 3. 光電効果の応用と天文学

さて、そういうわけで、今年はアインシュタインの光電効果仮説百周年というわけですが、光電効果が天文でどのように利用されているか見ていきましょう。

#### 3.1. 光電子増倍管

光電効果と言えば、外部光電効果を指すことが多い、と書きましたが、その応用例として天文でなじみ深いものに光電子増倍管(photomultiplier ホトマル)があります。光電効果で飛び出した電子を、さらに増幅させて計測するもので、1936年に発明され、1946年頃から天文観測に使われました。可視光の観測では、かつては写真観測と共に天文観測手段の主流でした。

天文観測では、通常、微弱な光を測定器に受けますから、十分高速で測定すれば、光子を1個1個数えられる程度の光量になります。光電子増倍管による明るさ測定とは、この光子のカウントを行っています。

光電子増倍管による観測では、天体からの光子がまず光電子面にあって電子が飛び出せば、それに電場をかけて加速してダイノードと呼ばれる金属酸化物や半導体の電極に衝

突させます。すると、数個の二次電子が飛び出してきます。これをまた加速して次のダイノードに衝突させるということを10~15回繰り返すことで、1個の光子が最終的に100万個もの電子に変換されます。これらを陽極に当てると、パルス状の電流として計測できます。

写真に比べて測光精度がはるかに高いため、恒星の測光観測は長い間光電子増倍管の独壇場でした。しかし、1個の光電子増倍管では、同時に1カ所しか測定できませんから、2次元観測が必要な銀河の観測や分光観測では、後述する CCD が普及するまでは写真観測が主流でした。

現在では、恒星の測光観測も CCD 観測が多くなりましたが、掩蔽(えんぺい)の瞬間のような速い時間変化の測光観測など一部の用途ではまだまだ光電子増倍管が使われています。超新星からのニュートリノを捉えたカミオカンデでは、水槽の壁面全体に巨大な光電子増倍管がびっしりと並び、ニュートリノ起源の微弱なチェレンコフ光の検出に活躍しています。

### 3.2. 光イオン化

2.1節で書いたように、広い意味での光電効果といえば、外部光電効果の他に、内部光電効果とに光イオン化(光電離 photoionization)があります。CCD は内部光電効果を利用していますが、これを説明する前に、光イオン化について触れておきます。

光イオン化(天文学界では「光電離」の方が一般的ですが)は、光子によって原子内の電子がたたき出され、原子のイオン価がさらにプラスされる現象です。その逆過程では、イオンと電子の再結合によって光子が放出されます。宇宙空間ではありふれた現象で、例えばオリオン大星雲の赤い輝き(H $\alpha$ 線)は、陽子と電子が再結合して中性の(つまりイオンで

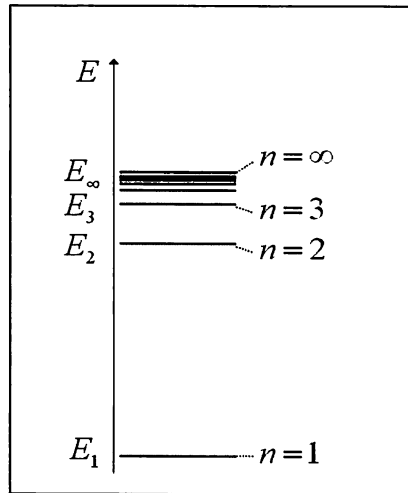


図1 水素原子の電子のエネルギー準位

はない)水素原子となる過程で放出される光です。

最も単純な水素原子の場合、それに束縛された電子が取り得る位置エネルギーは、連続的な値ではなく、図1のように、とびとびの値 $E_1, E_2, \dots$ を持ちます。これらをエネルギー準位とも呼びますが、このうち最も位置エネルギーの低い状態( $n=1$ )を基底状態と呼び、宇宙空間に浮かぶ中性水素原子の電子はほとんどこの状態にあります。そのときに、 $n=1$ と $n=2$ の状態のエネルギー差 $E_2 - E_1$ に等しいエネルギーをもった光子がやってくると、その光子を吸収して電子が $n=2$ の状態に移ることができます。図1の $n=\infty$ のエネルギー $E_\infty$ は電子が束縛と自由の境界にある状態で、 $n=1$ と $n=\infty$ のエネルギー差( $E_\infty - E_1$ )は水素原子のイオン化エネルギー(電離エネルギー)で、その大きさは13.6電子ボルトです。このイオン化エネルギー( $I$ で表す)よりもわずかに大きなエネルギー $h\nu$ を持つ光子が、基底状態にある水素原子に吸収されると、光子のエネルギーのうち、イオン化エネルギーの分が電子が飛び出す仕事として使われ、残りのエネルギー、 $h\nu - I$ は、飛び出した電子の運動エネ

ルギーになります。つまり、 $I$ は、外部光電効果の式(1)の仕事関数 $W$ にあたります。

エネルギー13.6電子ボルトの光子 $h\nu$ の波長 $c/\nu$ は91.2ナノメートルで、紫外線の中でも波長が短い方ですね。そして91.2ナノメートルより短波長の紫外線のみが、イオン化エネルギーより大きなエネルギーを持つため、基底状態の水素原子をイオン化できるのです。恒星の場合、スペクトル型がO、B型の高温星のみ、このような短波長の紫外線を十分放射して、広範囲のガスをイオン化し、HII領域を形成します。オリオン大星雲では、中心のO型星の集まり、トラペジウムがイオン化紫外線の供給源となっています。

### 3.3. CCD カメラ

CCDはcharge coupled device (電荷結合素子)の略で、内部光電効果によって天体からの光を電気信号として記録する検出器です。1976年頃から天体観測に使われはじめ、次第に写真乾板に取って代わるようになりました。CCDは写真乾板よりも30倍から100倍も感度がよいため、微光天体の検出や、観測時間の短縮による観測効率アップに活躍しています。アマチュア天文家用の安価なCCDカメラも市販されるようになり、アマチュアの天体写真の分野でも、銀塩写真によるアナログの時代から、CCDカメラやデジタルカメラによるデジタルの時代に移行しています。

可視光のCCDはシリコン半導体を基板として作られています。金属や半導体の結晶の場合、電子のエネルギー準位は水素原子の場合とは様子が違ってバンド構造となり、図2のように、価電子帯と導電子帯(伝導帯ともいう)に分かれます。価電子帯の準位には電子が詰まったまま動きませんが、導電子帯にある電子は自由電子のように動くことができます。その間にはバンドギャップと呼ばれるエネルギー準位のギャップがあります。シリコンで

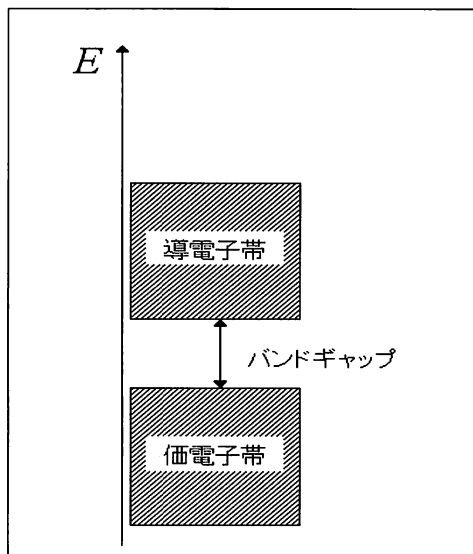


図2 シリコン半導体のエネルギー準位

はこのバンドギャップが1.1電子ボルトで、これは波長1100ナノメートルの光子のエネルギーと同じです。従って、可視光線の光子はシリコンのバンドギャップより大きなエネルギーを持っていますので、光子1個が吸収されると価電子帯の電子が1個、導電子帯にたたき上げられ(内部光電効果)、自由電子のように振る舞います。その際、価電子帯には1個の正孔(ホール)が残されます。たたき上げられた光電子は、放っておくと価電子帯に戻って正孔と再結合してしまうので、その前に光電子を安全な場所に集めておく仕組みをつくります(詳細は、例えば参考文献[4]をご覧ください)。CCDでは、このような仕組み1組を、シリコン素子上に基盤目状に配置し、2次元撮像素子として使えるようにしています。そして、光電子の分布としてシリコン素子に残された天体からの光の記録を、端から順に読み出す仕組みを備えています。

昔はCCDと言っても一般にはなじみが薄かったのですが、最近では、デジタルカメラやデジタルビデオカメラが普及したおかげで、カメラのカatalogにもよく見かけるようにな

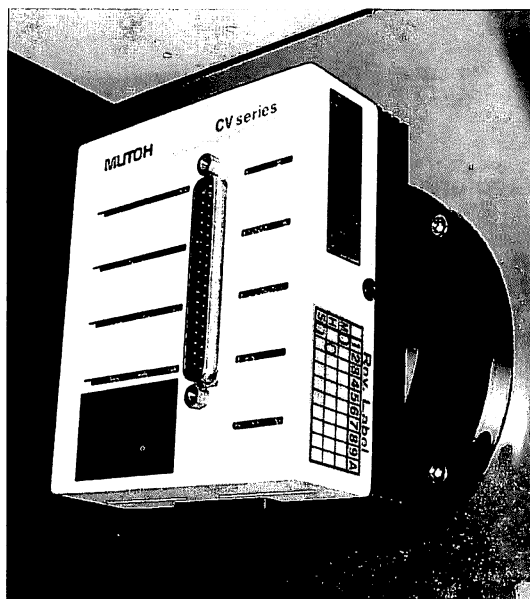


図3 美星天文台の CCD カメラ

りました。デジタルカメラでは、CCD の他に、CMOS もよく使われています。CMOS は読み出しのための構造が CCD と違っていますが、内部光電効果を利用していることには変わりありません。しかし、低消費電力、低製造コストのために、民生用では CCD より普及しそうです。カメラ付き携帯電話のカメラでは CMOS が主流のようです。

太陽電池も CCD と同様、シリコンを素材として内部光電効果で発生した光電子を利用しています。

#### 4. おわりに

光電効果といえば、昔はなにやら実験室だけの世界に見えましたが、天文観測の世界では、光電効果を利用した CCD カメラ (図3) が主流になっていますし、もっと一般に、カメラ付きケータイの普及を見れば、今や大部

分の国民が光電効果を活用していると言えるでしょう。アインシュタインの光電効果の理論の提案から、100 年経った今、ケータイのレンズを見つめながら、アインシュタインの、相対論以外の業績を見直してみてもいいのではないでしょうか。

#### 参考文献

- [1] A. Einstein (高田誠二 訳)「光の発生と変脱とに関するひとつの発見法的観点について」、物理学史研究刊行会編「光量子論」物理学古典論文叢書 2、東海大学出版会
- [2] 西條敏美 「物理学史断章 ー現代物理学への十二の小径ー」、恒星社厚生閣
- [3] A. パイス 「神は老獺にして… ～アインシュタインの人と学問～」
- [4] 宮崎聡 『光検出器の発展「高感度 CCD」』、「21 世紀の宇宙観測」第 3 章、家正則編、誠文堂新光社