

荷電粒子検出器

1. はじめに

荷電粒子検出器といってもその種類は千差万別で、荷電粒子をまったく感じない放射線検出器は無いといえるかもしれない。その根本原理は、荷電粒子が物質内を通過する際に、電離または励起を起こす。そのときに発生する電子やイオン（またはホール）か光を利用して検出する。また、特殊な例として、荷電粒子が、物質内で光より速く移動することによって発せられるチェレンコフ光を利用するものもある。電荷をもたない X 線や中性子も光電効果や特殊な反応を利用して荷電粒子に変換してから検出するのが一般的である。

この講義ではすべてを網羅することはできないので、ガス検出器を中心に話を進める。その比較対象という意味で、シンチレーションカウンターや半導体検出器も簡単に触れる。

また、素粒子・原子核実験においては、荷電粒子の運動量を測定するのに磁場を利用することが多い。偏向電磁石の前後に荷電粒子検出器を配置する場合やソレノイド磁場中に検出器を配置する場合が多い。また、実験に合わせてこれ以外の磁場や検出器配置をとる場合もある。ここでは、荷電粒子検出器そのものに焦点をあて、システム全体の話は割愛させていただく。

2. ガス検出器

ガス検出器は、金属細線（ワイヤー）を用いたものが一般的であるので、まずはガスワイヤーチェンバーを説明するが、詳しくは、有名は参考文献[1]を参照してください。他のガス検出器も説明するがワイヤーチェンバーの知識があると理解しやすい。

2.1. 特徴と動作原理

ワイヤーチェンバーは、荷電粒子がチェンバー内のガスをイオン化（電離）することによって電

子を生成し、その電子を種にワイヤー付近でガス増幅することによって電気信号を取り出す放射線検出器である。Fig.1 は、円筒形ガスワイヤーチェンバーで、Belle-II 実験に使われる中央飛跡検出器（CDC）の内層部である。また、Fig.2 に Belle 実験で多くの荷電粒子をとらえた事象を示す。



Fig.1 円筒形ガスワイヤーチェンバーで Belle-II 実験の中央飛跡検出器の内層部の写真

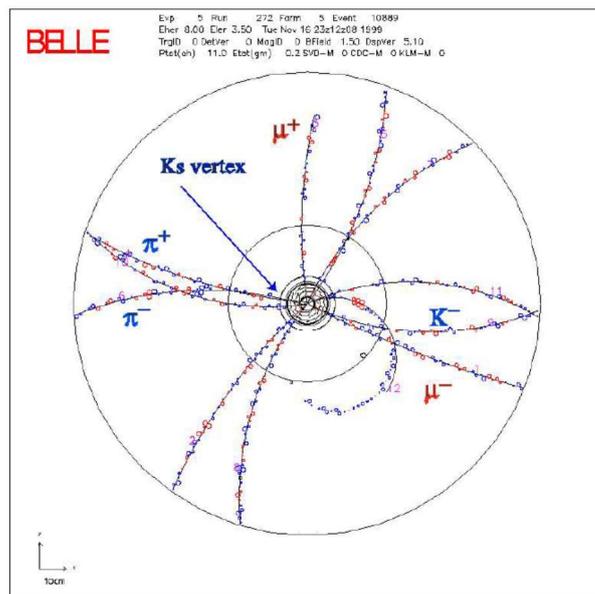


Fig.2 Belle 実験の CDC で得られた多くの荷電粒子を含む事象

ガス検出器の特徴は、比較的安価に大型化することができる。また、検出器の構成素材がワイヤーとガスの低物質質量であるので、測定すべき荷電粒子の状態を損なうことなく、測定可能である。このため、ワイヤーチェンバーは広く素粒子・原

子核実験に使用されていて、その開発に多大な貢献をした Georges Charpak は、1992 年にノーベル物理学賞を受賞している。さらに、比例計数管やガイガーカウンターとして、放射光実験、中性子実験など広い分野で用いられていて、放射能の測定にも利用されている。

ガスワイヤーチェンバーの動作原理には、4 つの重要な過程がある。1 つ目は荷電粒子がガス分子をイオン化（電離）して、最初の電子を生成することである。2 つ目は、生成された電子が、印加された高電圧によって形成された電場によって、陽極ワイヤーに移動することである。このことを電子のドリフトと呼んでいる。3 つ目は、最も重要な過程で、陽極ワイヤー付近で起こるガス増幅である。4 つ目が、最終的に電磁誘導により電気信号として取り出せる過程である。これらを順番に説明する。

2.2. イオン化

荷電粒子がガス中を通過すると荷電粒子とガス分子中の電子との衝突によって電子とイオンが荷電粒子の飛跡にそって生成される。これをイオン化（電離）という。荷電粒子は、この過程によりエネルギーを失うのでこのことを荷電粒子のエネルギー損失という。この過程で発生する電子の数は、エネルギー損失の量に比例するので、発生した電子の数を数えることができれば、エネルギー損失を測定できることになる。

このイオン化には 2 つの過程がある。最初のものが初期イオン化と呼ばれていて、アルゴンガスの場合に 1 cm 当たり約 30 個の電子が生成される。その初期イオン化で発生した電子のエネルギーは十分に高いので、その電子がガス分子と衝突することによってさらに電子を生成する。この過程により、最終的に発生する電子の数は、アルゴンガスの場合、1 cm 当たり 100 個ほどになる。これは、1 cm 当たりの荷電粒子のエネルギー損失が 2.5 keV であり、必要なイオン化エネルギーが 26 eV に相当することから計算される。

初期イオン化によってできた電子の中には特に大きなエネルギーをもったものがあり、その電

子のことを特別に δ -ray と呼んでいる。この電子は、飛跡として認識できるほどエネルギーの高い場合もあり、位置やエネルギー損失の測定に影響を与える。特に、位置測定において、通常のガウス分布の誤差の範囲を超えた影響を与えることがあるので注意が必要である。

イオン化によって出来た電子の総数の分布は、Fig. 3 に示すようにガウス分布ではなく、多い方にテイルを引く。これをランダウテイルと呼ぶ。これができる理由は、イオン化によって出来る電子の数が少ないことからくる統計的なものと δ -ray のように極端に多くの電子が生成される場合があるからである。このランダウテイルの大小は、ガスの種類によっていて原子番号の大きなものほど大きなテイルができる。

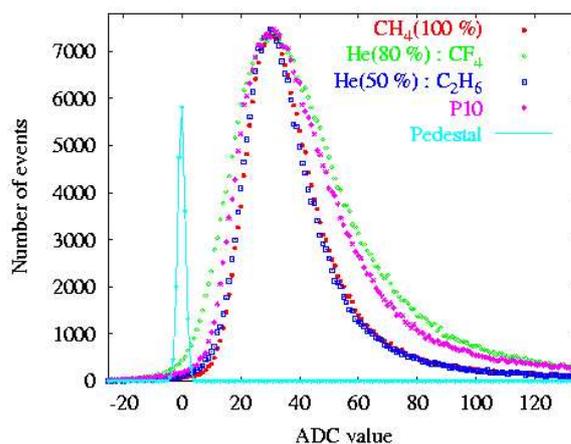


Fig. 3 色々なガスで得られた波高分布。ピークが同じになるように調整されている。

2.3. 電子の移動

高電圧を印加することによって形成された電場で、イオン化によって発生した電子が陽極ワイヤーに向かって移動する。このことを電子のドリフトという。電子は移動中にガス分子と衝突を繰り返すので、その移動速度は比較的遅いものとなる。その典型的な速度が 50 $\mu\text{m}/\text{ns}$ である。もし、ガスがなく真空ならその電子の速度は光速 (30 cm/ns) 近くなるのでそれと比較すると電子の移動速度が極めて遅いことがわかる。

ここで、粒子が通過してから（イオン化によって電子が発生してから）、陽極ワイヤーから信号が出るまでの時間を測定すれば、粒子が通過した場所が、陽極ワイヤーからどれくらい離れた場所であるかを知ることができる。このようにドリフト時間を測定することによって、通過位置を正確に求める測定器のことをドリフトチェンバーと呼んでいる。昔は、粒子の通過位置を正確に求めるためにワイヤーを密に張る必要があったが、最近では電子回路の発展によりドリフト時間を1ns程度の精度で測定することができ、0.2 mm程度の位置分解能を容易に得ることができるので、ほとんどすべての粒子の通過位置を測定したいガスワイヤーチェンバーはドリフトチェンバーになっている。

電子のドリフト速度は、ガスの種類によって違い、しかも、電場依存性がある (Fig. 4)。一般的に、高電場になればなるほどドリフト速度は一定値になる傾向にある。ドリフト速度が一定でなくても、電場は計算できるし、ドリフト速度の電場依存性がわかれば、ドリフト時間から陽極ワイヤーからの距離を計算することはできる。実際に多くのドリフトチェンバーは、この状態で使われている。

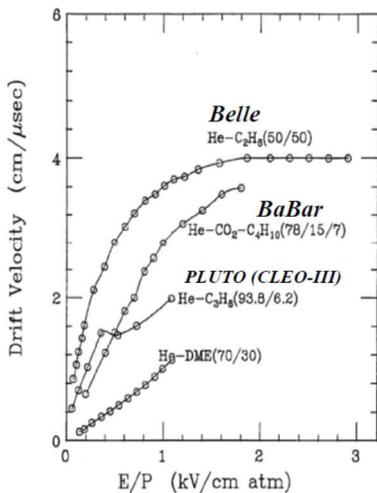


Fig. 4 電子のドリフト速度の電場依存性

荷電粒子の運動量を求めるために、チェンバーを磁場中で使用することもよくある。この場合は、ローレンツ力により電子の移動は陽極ワイヤ

ーに向かって最短距離を進むことができなくなる。電子は Fig. 5 に示す角度をもって進むことになるが、その角度のことをローレンツ角 α と呼んでいて、次のような式で表される。

$$\tan \alpha = c \frac{B \cdot v_0}{E} \quad (2-1)$$

ここで、 B は磁場(テスラ)で E は電場 (V/m)、 v_0 は磁場の無いときのドリフト速度 (m/s) である。ローレンツ角が小さい場合は、係数 c は1に近い値であるが、ローレンツ角が大きくなると係数 c も1からずれて大きな値になるので注意が必要である。ここで、電場が強いとローレンツ角が小さくなるので実際の使用で電子の移動時間が短くなるので有利性がある。

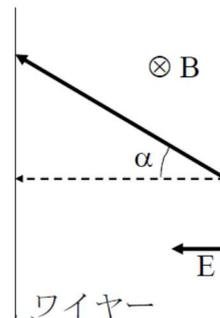


Fig. 5 磁場中の電子のドリフト

イオン化によって出来た電子の分布が、移動中の多重散乱による拡散現象によりその分布が広がってしまう。その拡散の大きさはドリフト距離の平方根に比例するので、ドリフト距離が長くなるチェンバーの場合は注意が必要である。拡散比例係数は、ガスの種類により大きく変わり、電場依存性もある (Fig. 6)。一般的によく使われているアルゴンガスの場合は、この拡散比例係数が大きい。二酸化炭素はクールガスと言われていて、拡散比例係数が小さいので、よい位置分解能が必要で比較的長いドリフト距離があるチェンバーに用いられることが多い。

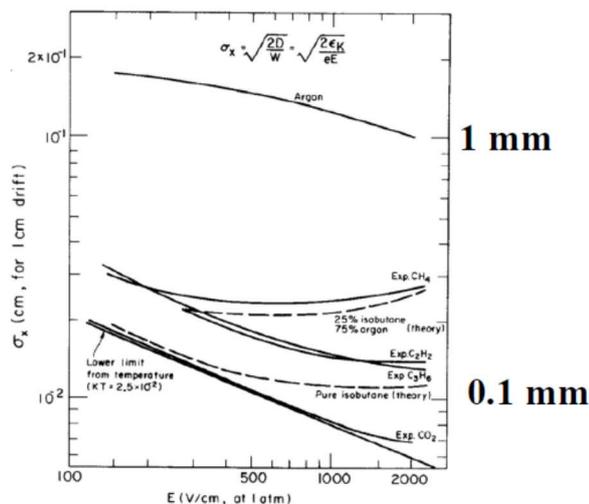


Fig. 6 電子 1 個に対する拡散係数 [1]

さらに、ある種のガスでは、電子がドリフト中にガス分子との衝突により、ガス分子に吸収されてしまうことがある。このような性質が顕著なガスのことを陰性ガスという。酸素もその一種であるので、空気をチェンバーガスとして使うことはできない。チェンバー内に酸素が残っているとドリフト距離によりイオン化により発生した電子の数がどんどん減ってしまうことになる。特にドリフト距離が長いチェンバーの場合は、少量の酸素でも影響が出るので注意が必要である。また、フロンと呼ばれるガスは、この吸収効果が大きいので、それを積極的に利用したチェンバーもある。

電子のドリフトの節として、最後に電場のかけ方にふれておく。陽極ワイヤーに正の高電圧をかける場合と陰極に負の高電圧をかける場合がある。陽極ワイヤーに正の高電圧を印加する場合は、信号を読み出す場合に高電圧が電子回路にかからないようにするために、比較的容量の大きなデカップリングコンデンサー（例えば、1000 pF）を使わなければならない。過去にはこのコンデンサーの不良により電子回路が壊れるという問題があったと聞いているが、最近では、コンデンサーがよくなったためかそのようなことは起こっていない。陽極に負の高電圧をかける場合は、多くのワイヤーに高電圧を印加する必要があったり、

他のチェンバー部品との間を絶縁しなければならないなどの問題がある。

2.4. ガス増幅

ガス増幅がガスワイヤーチェンバーを動作させる上でもっとも大切な過程である。

陽極に細いワイヤーを使用するとその近傍に高電場が形成される。その大きさは、30 kV/cm 以上にすることが容易である。陽極ワイヤーに電子が近づくと電子は、電場からエネルギーをもらって加速される。その加速された電子がガス分子と衝突することによってイオン化で電子を作り出す。ここで作られた電子を含めてすぐに電場からエネルギーもらって加速され、また次の電子を作る。この過程を繰り返すことによって電子の数がネズミ算式に増大する (Fig. 7)。このことをガス増幅（または電子雪崩）という。その増幅度は、10 万倍というものも容易に達成できる。このガス増幅が、イオン化によって発生した電子の数が少なくても、最終的には荷電粒子の通過を電気信号として計測できるようにする根本的な要因である。

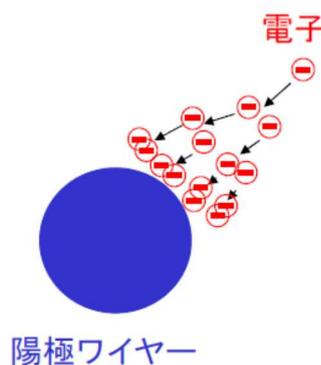


Fig. 7 ガス増幅の様子

電気信号の大きさ（最終的に出来た電子の総数）は、最初にイオン化によって出来た電子の数（エネルギー損失）に比例する。ただし、ガス増幅度があまり大きくなりすぎると比例関係がくずれてくる。

イオン化によって出来た電子は、ほとんどの領域で電子の数は変わらずに多重散乱を繰り返して、陽極ワイヤーに近づいてくる。そして陽極ワイヤーの近傍（ワイヤーの直径程度）まで近づいてくると電場が十分に強くなりガス増幅が始まり、その電子群がワイヤー表面の到達する間に10万倍まで増幅することになる（Fig. 8）。増幅の始まるのに必要な電場（30 kV/cm程度）は、電子がガス分子と衝突してエネルギーを失ってしまう前に、ガス分子をイオン化できるのに十分なエネルギーが得ることができると強い電場ということになる。つまり、電場と平均自由行程をかけたものがイオン化エネルギーを超える必要があるということである。

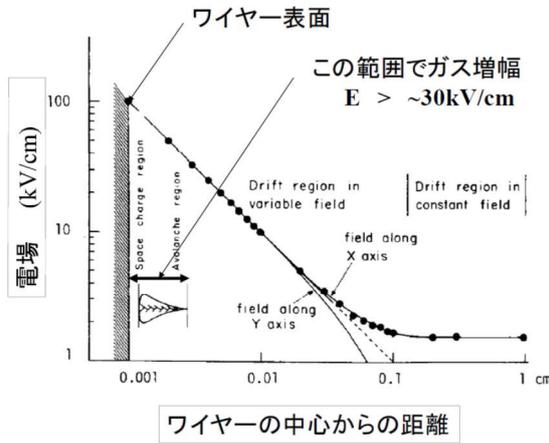


Fig. 8 電場のワイヤーからの距離依存性 [1]。陽極ワイヤー近傍のみでガス増幅する。

ガス増幅度を単純な円筒形のチェンバー構造（半径 a の陽極ワイヤー、半径 b の陰極外筒）で考察してみる。まず、陽極ワイヤーの中心からの距離 r のところでの電場 E は、印加されている高電圧 V_0 で次式のように表される。ここで C はこのチェンバーの電気容量である。

$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0 r}, \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} \quad (2-2)$$

電子がガス分子と衝突して次の電子を放出するまでの移動する平均距離は次式と仮定する。

$$\Delta r = 1/(kN\epsilon) \quad (2-3)$$

ここで、 N はガス分子の密度、 ϵ は電子のエネルギー k はガスの種類によって違う電子とガス分子との衝突断面積を表す比例係数を表す。電子が電場から移動中にもらうエネルギーは、単純に次式である。

$$\epsilon = E(r) \cdot \Delta r \quad (2-4)$$

ここから、衝突までの移動距離のワイヤー中心からの距離依存性が次式のように導かれる。

$$\Delta r(r) = \frac{1}{\sqrt{kNE(r)}} \quad (2-5)$$

電子 n 個が dr 移動する間に増える電子の数は次式のように計算される。

$$dn = -n \cdot 1/\Delta r(r) \cdot dr = -n \cdot \sqrt{kNE(r)} \cdot dr = -n \sqrt{\frac{kNCV_0}{2\pi\epsilon_0}} \sqrt{\frac{1}{r}} \quad (2-6)$$

これを積分すると、ガス増幅度 M は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} M &= \frac{n_{final}}{n_{init}} = \exp \sqrt{\frac{kNCV_0}{2\pi\epsilon_0}} \int_a^{r_c} \sqrt{\frac{1}{r}} dr \\ &= \exp \left[2 \sqrt{\frac{kNCV_0 a}{2\pi\epsilon_0}} \left(\sqrt{\frac{r_c}{a}} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

ガス増幅の始まる径 r_c は、条件によって大きく変わるので、ガス増幅の始まる電子のエネルギー ϵ_c で書き換えると次式のようにになる

$$M = \exp\left(\frac{Q}{\pi\epsilon_0\epsilon_c} - \sqrt{\frac{2kNQa}{\pi\epsilon_0}}\right) \quad (2-8)$$

$$\epsilon_c^2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0kN} \frac{1}{r_c}, \quad Q = CV_0 \quad (2-9)$$

この式で ϵ_c , k はガスのみによるパラメーターで ϵ_c はガス分子のイオン化エネルギーに対応している。この式からわかることは、陽極ワイヤー径 a が同じなら、ガス増幅度は Q （線電荷）のみによる。セルの大きさ b は C を通してのみ影響するが、陽極ワイヤーの径 a は C を通して影響する分と直接影響する分がある。ガスの温度 T 、圧力 P は、ガス分子密度 N を通して影響する。 N が大きくなると増幅度は下がる。

得られた増幅度の式からは高い電圧をかければかけるほどガス増幅度が大きくなるが、実際にはそうはいかない。ガス増幅度が大きくなるとある制御機能がないと持続的に信号が発生してしまい、安定した動作が得られない。ガス増幅過程でイオン化した分子から外殻電子が基底レベルに落ちる際に紫外線が発生する。この紫外線が金属ワイヤーや金属壁に当たって光電効果により電子が発生する。その電子が陽極ワイヤーに移動してきて次のガス増幅が起こり、また、紫外線を出す。これを繰り返すことによって、安定した動作ができなくなる。ちなみに、希ガス（例えば、アルゴン）だけのチェンバーでは、大きなガス増幅度を得ることができない。そこで、その紫外線を吸収するためにクエンチャーと呼ばれるガス（メタンなどの炭化水素系のガスがよくつかわれる）を加える。クエンチャーガスは、紫外線を吸収しても電子を出すことはない。逆にクエンチャーガスだけを充てんしたガスチェンバーはきちんと動作する。それでもアルゴンがチェンバーガスとして広く使われてきた理由は、まず安価であることが上げられる。2つ目は、比較的低い電圧で高い増幅度が得られることも好まれたのである。3つ目が、X線に対しての感度が高いからである。X線は原子番号の大きなものほど光電効果による反応断面積が顕著に大きくなるので、X線を測定し

たい場合は、アルゴン（あるいは、それよりも大きな原子番号のガス）を使うことの有利性は大きい。逆に荷電粒子を対象とする測定器では、その有利性は不要であるので、アルゴンを含まないガスを使用する例も出てきている。Belle 実験の中央飛跡検出器では、ヘリウムとエタンを50%ずつ混ぜたガスを使っている [2]。

2.5. 電磁誘導によるパルス信号の生成

最終的な電気信号（パルス信号）は、電子、及びイオンの移動による電磁誘導で発生する。大量の電子は、陽極ワイヤーの表面近くで発生するので、すぐに陽極ワイヤーに到達してしまつて移動することができないので電気信号への寄与は小さいものである。ほとんどの電気信号は、陽極ワイヤー表面近くで発生したイオンが、陽極ワイヤーから遠ざかる様子が見えていることになる。

ここで注意すべきことは、電子が陽極ワイヤーに到達することによって信号が見えているわけではないことである。仮想的に2つの平行板電極の間で電荷が揺れていることを考える。電荷は電極に到達することがなくてもその電荷の揺れを電極から電気信号として見るができるのである。あくまでも電荷の移動が重要なので、電子はほとんど動かないので電気信号への寄与は小さく、イオンの移動が見えることになる。例えば、陰極からも信号を取り出すチャンバーの場合でも、もちろん、イオンが陰極に到達したときに信号が出るわけではなく、あくまでもイオンが陽極ワイヤー付近で移動する様子が見えるので、陽極と陰極で同時に信号が見えるのである。

ここでイオンは電子に比べて非常に重いのでその移動速度は遅く、飽和することなく電場の強さに比例する。イオンが電場の強いワイヤー付近で急速に動くときに電気信号への寄与が大きい。しかし、イオンは長い時間かけて陰極に到達するので、その間は電気信号が出続けることになる。すべての電気信号をとらえるためには長い積分時間が必要であるが、電氣的な微分回路でゆっくりとした成分を取り除いて電気信号を取り出す

と短いパルス信号となり、高計数率に耐えることができる。

2.6. ガス増幅度の違いによる検出器の種類

ガスワイヤーチェンバーは、そのガス増幅度によってさまざまな種類がある。逆に、使用目的に合わせて、ガス増幅度を選択する必要があるともいえる。Fig. 9 に示すように、印加する電圧によって増幅度は次第に大きくなるが、それぞれの領域の特徴を以下に示す。

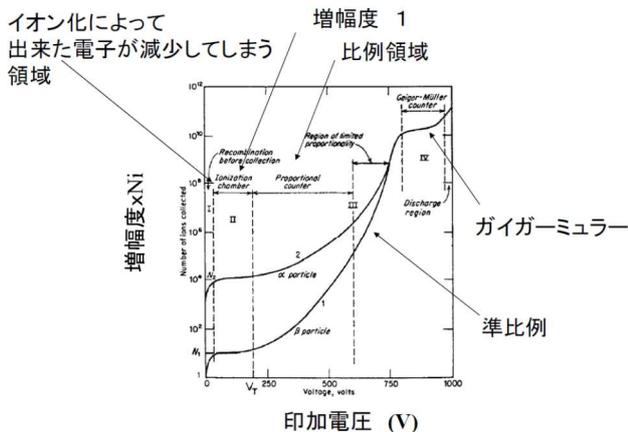


Fig. 9 ガス増幅度の印加電圧依存性 [1]

1 つ目は、最初のイオン化によってできた電子の数が変わらない領域である。この領域ではガス増幅は起こらないので、ガス増幅度は1であるといえる。この領域で使うチェンバーは、イオンチェンバー（電離箱）と言われていて、ビームダンプなどの大量の粒子が入射される環境下でのビーム強度モニターなどに使われる。高い電場を形成する必要がないので、細い金属ワイヤーを張る必要がなく、単純な構造で安定して動作させることが可能である。電場が弱すぎる場合は、電子（またはイオン）がガス分子に吸収されてしまったり、信号が小さくなってしまったりする。

2 つ目は、ガス増幅によってできた電子の総数がイオン化によってできた電子の数に比例している領域である。この領域で使われるチェンバーのことを比例計数管と呼んでいて最も広く使われている。円筒形の外筒の中に1本の陽極ワイヤーが張られている単純なものから何万本ものワイヤーを張ることによって広い領域をカバーする巨大装置まであり、その種類は千差万別である。

3 番目の領域が、電子の総数が比例関係からずれてくる領域である。ガス増幅過程において、電子数が大きくなってくるとその電子群が作る電場によって、もともとあった電場が弱められてしまったり、ガス増幅度が抑えられてしまう。このことを空間電荷効果と呼んでいる。また、少し太めのワイヤーと紫外線をよく吸収するガスを選択することによって、大きめのガス増幅度を得ることも可能である。この現象はリミテッドストリーマーと呼ばれていて、信号を読み出すための前置増幅器が不要になることもあって、一時、盛んに研究されていた。現在は、電子回路技術の発展に伴って、安価に良い性能の前置増幅器が得られることから、限定されたところでしか使われていない。

5 番目は、ガス増幅がワイヤー全長にわたって起こる領域である。この領域では、最初のイオン化によってできた電子の数に関係なく、非常に大きなガス増幅度が得られることから昔からガイガー・ミュラー計数管として使われてきた。現在でも環境放射能などの測定に利用されている。

一般にガス増幅度が大きくなるにしたがって、信号が大きくなるので信号を読み出すための電子回路が容易になるといえる。ただし、その分、最初のイオン化によってできた電子数の情報を失ってしまう。また、不感時間・空間が大きくなる。さらに、放射線損傷でチェンバーの寿命が問題になることも考えられる。いずれにしても、実際に使用する目的・使用環境によって、どのガス増幅度で動作させるのが最適であるかは決めていかなければならない。

2.7. 位置分解能を決める要因

ガスワイヤーチェンバーは、ドリフト時間を測って荷電粒子の通過位置を正確に求める場合が多い。そこで、どのような要因でその位置分解能が決まっているかを考える。

まず、最初に考えるのがイオン化時の統計的なふらつきである。初期イオン化が起こる割合は、平均で1 mmあたり3個程度であるので、ワイヤーからもっとも近い距離のところで常にイオン化による電子ができるわけではない。それによって、同じ場所を粒子が通過しても最初の電子がワイヤー到達するまでの時間は統計的にばらついてしまうのである。この効果は、陽極ワイヤーの近くを荷電粒子が通過した場合は大きく、遠くを通過すれば、薄れることは容易に理解できる (Fig. 10)。しかし、ここで注意しなければならないのは、最初の電子がワイヤーに到達した時に、電気信号が閾値 (信号を電氣的ノイズと区別するために設ける値) を超えるとは限らない点である。特に、閾値が十分に小さくできない場合や信号の立ち上がりが十分に小さくない場合などは、複数の電子が作る信号によってはじめて閾値を超えるので、イオン化の統計的ふらつきの効果が大きくなる。

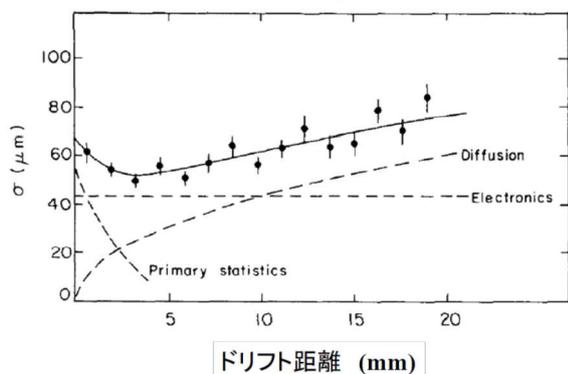


Fig. 10 位置分解能のドリフト距離依存性 [1]

2つ目の効果は、ドリフト中の拡散である。すでに電子の移動の節で説明した通り、拡散により電子がワイヤーに到達する時間にふらつきが生まれる。特にドリフト距離が長いチェンバーではこの効果は主に位置分解能を決めてしまうので注意が必要である。

3番目の要因が、電氣的ノイズと Time walk である。純粋な信号の形が同じでも電氣的なノイズが加われば、閾値を超える時間がふらついてしまうことは容易に理解できる。Time walk は、

電気信号の立ち上がりが有限であるために、閾値が同じでも信号の大きさによって、閾値を超える時間が違ってきてしまうことである。この影響を信号の大きさを記録して、補正することによって緩和することが実際に行われている。

2.8. ワイヤーにそった方向の位置測定

ここまでは、陽極ワイヤーに垂直方向の位置を測定することを前提に説明してきた。実際の実験では、粒子を3次元的にとらえたい場合がほとんどである。そこで、ワイヤーにそった方向の位置をどう測定するかを考える。

1つ目の方法が電荷分割法である。荷電粒子が通過することによって発生した電気信号は、ワイヤーの端から測定することになる。ワイヤーには有限な抵抗値があるので、両端から出る電気信号の大きさには、荷電粒子の通過した場所によって違いがでることになる。この違いを正確に測定することによって、ワイヤーにそった方向の位置をもとめることを電荷分割法という。この測定のためには、ワイヤーの抵抗値がある程度大きい方がよく、使用する前置増幅度の入力インピーダンスが小さい方が有利である。これまでの例からこの方法で得られる位置精度は、ワイヤー長の1%程度とされているので、1 m のチェンバーの場合は10 mm程度の精度が得られるということになる。両端から信号読み出しを行わなければならないという煩雑さはあるが、1本のワイヤーで3次元情報が得られるという点が最も特徴的である。

2つ目の方法がステレオワイヤーという方法である。一般的に荷電粒子のエネルギーは十分に高いので、複数のワイヤー層を通過することが可能である。そうであれば、ワイヤーの張ってある向きが垂直になるように複数の層を配置すれば、全体として荷電粒子の飛跡を3次元的に再構成することが可能である。複数の荷電粒子が通過するような場合は、ソフト的に1個1個独立に測定できるように斜めに張ってある層を組み合わせる場合もしばしばである。この応用がステレオレイヤーの方法である。円筒形チェンバーの場合は、ワイヤーを垂直に張ることは難しい。そこで、交差

角がかなり小さい状態（例えば、5度）でワイヤーを張る。それでもワイヤー方向の位置をソフト的に求めることが可能でその位置分解能は、ワイヤーに垂直方向の10倍程度である（5度の場合、 $1/\sin 5^\circ \sim 11.5$ 倍）である。この方法が、製作が容易であること、電子回路が余分に要らないこと、物質量が少なくて済むことなどの理由で多くの実験で採用されている。

3番目の方法が、カソードストリップを用いる方法である。ガス増幅の節で説明したように、ガス増幅によって発生する電気信号は、陰極でも測定可能である。そこで、ワイヤー方向にそって、陰極を分割しておいて信号を取り出せば、位置測定が可能である。この場合は、信号のアナログ情報を正確に読み出せば、0.5 mmという位置分解能も容易に達成可能である。1つの信号を複数の陰極で読み出すためにどうしても信号が相対的に小さくなってしまったりカソードストリップの電気容量が大きくなってしまったりすることからくる電気ノイズとのS/Nが悪くなる問題がある。

2.9. RPC と MPGD

細い金属ワイヤーを大量に張ることはそれなりに大変な作業を必要とする。そこで、ワイヤーを使わないガスチェンバーを製作したいという要求は常に存在する。そこで開発されているのが、RPC(Resistive Plate Chamber)と Micro-Pattern Gas Detector (MPGD) であるが、これらの詳しい話は本講義の範囲を超えるので、簡単に述べるだけに留める。

RPC[3]は狭いギャップをもつ平行板に高電圧を印加して、ガス増幅を起こさせるチェンバーである (Fig. 11)。電極に高抵抗素材を利用することによって、一旦、信号が発生するとその区域だけ電圧が一時的に低下して、継続的な放電を抑えることができる。高抵抗素材でなければ、電荷がすぐに供給されて、局所的にも電圧降下がおきない。発生した電気信号は、高抵抗素材の外側に配置された読み出し電極（ストリップまたはパッド）に誘起される。これにも高抵抗素材は重要な

役割をしていて、抵抗値が小さければ、電気信号はシールドされて外側では測定することができない。まとめると高抵抗素材は、DC的には導体として働き電荷を供給するが、AC的には絶縁体として働くということである。容易に想像がつくと思うが、この検出器は高い計数率を得ることができないので、宇宙線の測定や比較的計数率の低い環境下で有効に使われている。

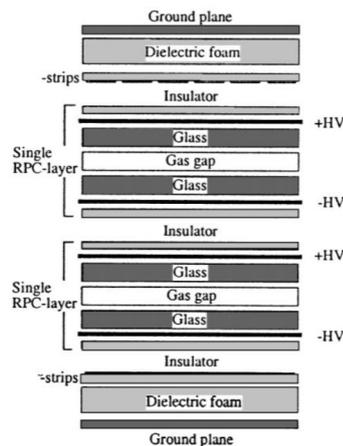


Fig. 11 Belle 実験で使用されている RPC の構造。薄いガス層が2層ある [3]。

最近、微細加工技術の発展に伴って、MPGD と呼ばれる測定器の開発が盛んに行われている。これもワイヤーを使わないガスチェンバーである。最近の素粒子・原子核実験では、入射粒子の頻度が非常に高い場合がある。これまでのワイヤーチェンバーでは、あまり高い入射頻度の状況下ではガス増幅度が落ちてしまったり使用不可能になってしまう。そこで新しい試みとして MPGD の開発が進められている。MPGD には、大別して3種類のものがある。

1つ目が Micro-Strip Gas Chamber (MSGC) である。細分化された電極をエッチング技術で形成し、そこに高電圧を印加することによって高電場を形成してガス増幅を起こさせるものである。一時、世界的に開発が進められたが、絶縁層に電荷が蓄積して放電するなどの問題を回避することが難しく、高い増幅度得られずにその開発が今は下火であるといえる。日本では、京都大学が中心となっているグループが勢力的に研究開発を

進めて、 μ -PIC と呼ばれるチェンバーが実験にも使われている [4]。

2 つ目が Micromesh Gaseous Detector (MICROMEAS) である [5]。この測定器の構造は、金属メッシュを読み出し基板の上に $50\ \mu\text{m}$ 程度のギャップをあけて配置するもので、そのギャップ間に高電圧を印加して高電場を形成してガス増幅を行うものである。 $50\ \mu\text{m}$ 程度というのが重要なパラメーターで、ワイヤーチェンバーのガス増幅の節で説明したように、ワイヤー表面からワイヤー径相当のところからガス増幅が始まるので、その値とこのギャップ間は同程度であるということである。ギャップが広すぎてもガス増幅は安定しない。狭すぎれば、ガス増幅度が十分に得られないことになる。狭い間隔に高電圧を印加しても間隔を維持するためにスペーサーがほどよく密に配置されている。基本的に MICROMEAS の場合は、このギャップは 1 段で十分な増幅度が得られる。複数段にする試みもなされているが電場を段ごとに上げていく必要があり、あまり得策とは言えない。

最後の例が、Gas Electron Multiplier (GEM) である [6]。これは、通常の両面フレキシブル基板に多数の細孔をあけて、両面間に高電圧を印加して、細孔内に高電場を形成して、ガス増幅を起こさせるものである (Fig. 12)。典型的なものとして、孔径が $70\ \mu\text{m}$ 、孔ピッチが $140\ \mu\text{m}$ 、絶縁体の厚みが $50\ \mu\text{m}$ 、銅箔の厚みが $5\ \mu\text{m}$ である。ここでも厚みが $50\ \mu\text{m}$ であるのは、前述の通りである。GEM の場合は、MICROMEAS と違って、GEM 間に高電圧を印加しているので、多段に重ねることが一般的で、3 段構造にして、必要なガス増幅を得られるようにしているものが多い。読み出し陽極構造は、GEM とは独立に構成することができるので自由なパターンを配置することが可能である。

これらの MPGD 検出器は、ワイヤーチェンバーと違って、2 次元位置情報を等方的に精度よく得ることが可能であるという特徴をもっている。荷電粒子検出器として高計数率が必要な環境下で使用するだけにとどまらず、X 線や中性子

を画像としてとらえるような使い方として用いられることも出てきている [7]。

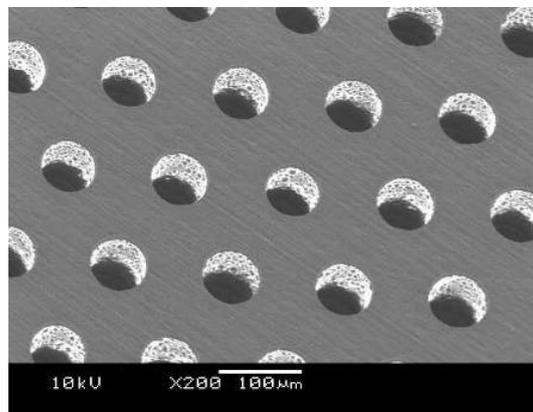


Fig. 12 GEM の電子顕微鏡写真

3. シンチレーションカウンター

シンチレーションとは日本語で蛍光である。荷電粒子が物質内を通過すると原子を励起して、その状態から元の基底状態に戻る際に光を出す。その光を光電子増倍管などの光センサーで電子信号として取り出すものをシンチレーションカウンターと呼んでいる。光を利用することから物質は透明なものである必要があり、発光量が多くて、発光するまでの時間ができるだけ短い時間のものが高計数率に耐えられるという意味において有益である。また、発光される光の波長も光センサーに感度があるものが適しているといえる。このシンチレーションカウンターには 2 種類のものがあり、シンチレーション物質をプラスチックに混ぜたものと結晶型のものがある。結晶型のもも荷電粒子をとらえることができるが、ガンマ線を測定するのに適しているので、ここでは割愛する。

3.1. プラスチックシンチレーションカウンター

プラスチックシンチレーションカウンターは、蛍光物質を透明なプラスチックに混ぜ込んで荷電粒子が通過すると発光し、光センサーで電気信号として取り出す装置である (Fig. 13)。プラスチックは目的に合わせて、厚みや大きさを容易に機械加工することが可能であり、光電子増倍管と

組み合わせることによって、簡単に確実に動作する放射線検出器として広く利用されている。特に短時間で信号が得られ、高計数率に耐えられることからトリガーカウンターとして用いられることが多い。さらに正確な時間情報が得られることから飛行時間を測定する検出器として粒子識別に用いられることが多い。光電子増倍管が比較的高価であるということからシンチレーターを細分化することはあまりやられてこなかった。



Fig. 13 シンチレーションカウンター

3.2. 位置測定型のシンチレーターカウンター

最近では、光電子増倍管に代わる半導体光センサーとしてガイガーモードマルチピクセルアパランシェフォトダイオード(MPPCまたはSiPM)と呼ばれているものが開発され、使用可能となってきた。これは光電子増倍管に比べるとずっとコンパクトで安価であるので、これを利用して細分化されたシンチレーションカウンターを製作することが可能となってきた。これにより荷電粒子の通過位置をこれまでよりもずっと正確に測定することができる。これの最初の例が、数センチの短冊状のシンチレーターの中に波長変換ファイバーを仕込んで、それを端部に付けたMPPCで光から電気信号に変えて読み出すものである[8]。1 m以上の短冊状のものでも確実に荷電粒子の通過を認識できるものが作られている (Fig. 14)。また、さらにファイバートラッカーと称される直径が1 mm程度のシンチレーションファイバーを敷き詰めてMPPCを利用して読み出すものもある (Fig. 15)。ここまできるとまるでワイヤ

ーチェンバーかのように動作させることも可能であり、トラッカーと呼ぶにふさわしいものである。

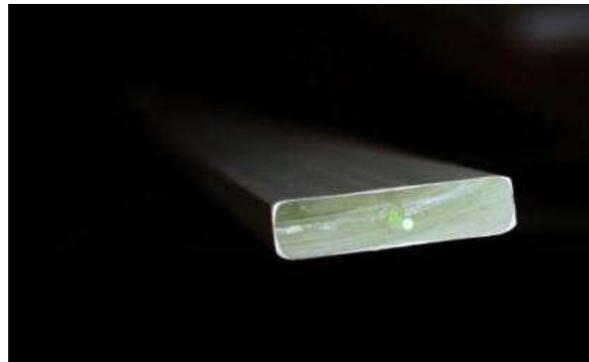


Fig. 14 真ん中に波長変換ファイバーが組み込まれたシンチレーター

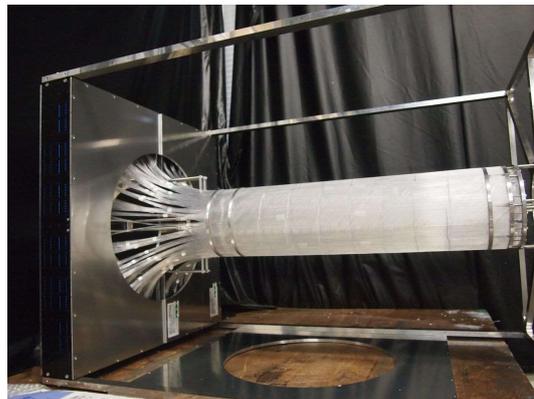


Fig. 15 トラッカーとして製作されているシンチレーションファイバー [9]

4. 半導体検出器

一般社会の半導体技術の発展にともなって、その技術を応用した放射線検出器が広く使われるようになってきた。特に、精度よく粒子の通過位置を測定したい場合や粒子の入射頻度の高いところではガスワイヤーチェンバーでは対応しきれない。そこで半導体検出器が使われてきている。この検出器の詳しい話はこの講義の範囲を超えるのでここでは簡単に紹介するだけに留める。

4.1. 特徴と動作原理

荷電粒子が半導体検出器内を通過するとガスチェンバーの電子とイオンのように電子とホールができる。これを集めて信号として取り出すのが半導体検出器である。ガスチェンバーと大きく違う点は、ガス増幅に相当する増幅過程がないので発生する電気信号はかなり小さい。もちろん、ガスと比べて個体である半導体の物質量は大きいので荷電粒子は多くのエネルギー損失をする。それにより最初の電子（またはホール）の数はかなり多い（100倍あるいはそれ以上）。それでも増幅過程がないので、高精度の前置増幅器をすぐ近くに配置する必要がある。これによってはじめて1個の荷電粒子の通過を電気信号として取り出すことが可能となった。

半導体の微細加工技術をもってすれば、細かいストリップを形成することは容易で、例えば、ガスワイヤーチェンバーでは不可能な50 μmピッチのストリップを配置することも可能である。

4.2. 実際の検出器

半導体検出器は、1次元ストリップから始まって、両面にXYストリップを配置できるようになってきた。前置増幅器の高性能を維持するためにはセンサーの容量が小さくなくてはならない。そのため長いストリップを1個の前置増幅器で読み出すことはできないので、大きな面積をカバーすることは大変であり、物質量という意味においてはガスチェンバーよりもどうしても多くなってしまう。逆に、より細かく高頻度に耐えられるようにピクセルタイプの検出器の開発も盛んに行われている。この場合は、膨大なチャンネル数になってしまうのでそのデータ処理をどうするかも重大な開発項目であるといえる。

5. まとめ

3種類の荷電粒子検出器を説明してきた。ここでは、まとめとして理解の助けとなるように比較表を示す。数値はオーダーであり、あくまでも目

安であり、それぞれの検出器の最高性能を示すものでないので注意が必要である。

まずは位置分解能をTable 1に示す。

Table 1 位置分解能

| | |
|---------|---------------------|
| ガス検出器 | 0.1 mm |
| シンチレーター | 10 mm (ファイバー: 1 mm) |
| 半導体検出器 | 0.01 mm |

次に時間分解能をTable 2に示す。

Table 2 時間分解能

| | |
|---------|----------|
| ガス検出器 | 1 nsec |
| シンチレーター | 0.1 nsec |
| 半導体検出器 | 10 nsec |

次に検出器の取り扱いやすさをTable 3に示すが、かなり主観的な側面もある。

Table 3 扱い易さ

| | |
|---------|-------|
| ガス検出器 | 普通 |
| シンチレーター | 比較的簡単 |
| 半導体検出器 | 難しい |

次が物質量であるが、構造によるので難しいがTable 4に示す。

Table 4 物質量

| | |
|---------|---|
| ガス検出器 | 小 |
| シンチレーター | 大 |
| 半導体検出器 | 中 |

最後にコストにも一応ふれておく。さらに比較は難しいが単位面積当たりを念頭に、Table 5に示す。

Table 5 コスト

| | |
|---------|------|
| ガス検出器 | 安価 |
| シンチレーター | 中ぐらい |
| 半導体検出器 | 高価 |

参考文献

- [1] F. Sauli, “Principle of operation of multiwire proportional and drift chamber”, CERN 77-09, 3 May 1977
- [2] S. Uno et al., Nucl. Instr. and Meth. A 330 (1993) 55
- [3] A. Abashian et al, Nucl. Instr. and Meth. A 449 (2000) 112
- [4] A. Ochi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 471 (2001) 264
- [5] Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert, G. Charpak, Nucl. Instr. and Meth. A 376 (1996) 29
- [6] F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531
- [7] S. Uno et al., Physics Procedia 37 (2012) 600
- [8] Y. Kudenko, Nucl. Instr. and Meth. A 598 (2009) 289
- [9] K. Miwa, private communication