



STEP-V#9

26th February, 2022

How to measure electrostatic charge on particles

Tatsushi Matsuyama

Soka University

Hachioji, Tokyo Japan

tatsushi@t.soka.ac.jp

Reference:
 Tatsushi Matsuyama
 "How to measure electrostatic charge on particles"
 Journal of Institute of Electrostatics Japan
 vol.41 (2017) pp.74-79
 (in Japanese)

特 集 解 説

粉体・粒子の帯電量計測法概論

松山 達¹

How to Measure Electrostatic Charge on Particles
 Tatsushi MATSUYAMA²

(Received February 7, 2017)

1. はじめに

本稿では粉体・粒子の帯電量の計測方法について概説する。まず、おおまかに分類すると、粒子1個1個の持つ電荷を測定する方法と、複数粒子をまとめて全体の帯電量を計測する方法とが考えられる。研究目的で帯電量を計測しようとする、多くの場合には、複数粒子全体の帯電量を計測できると個々の粒子の帯電量が知りたくなり、1個1個の粒子の電荷を計測できるようにする、1個粒子表面の電荷分布を知りたくなる、というのが、情である。他方、工程管理のような用途であれば、むしろ粒子集合体の帯電量を把握すべきである場合も多いので、計測法はその目的によって選択されるべきものであることは留意が必要である。

これは静電気学会誌の特集解説記事なので、ここで予め、粒子帯電量計測に関する「問題点」あるいは課題について述べておこうと思う。それは「サンプリングの問題」に尽きる。各種測定法では「測定ゾーンに入った」粒子の持つ電荷を測定するのだが、逆にいえば結局、測定対象粒子の帯電量が「全く影響を及ぼさず」粒子をサンプリングして測定ゾーンに導入するための一般化可能な方法論が欠如しているのである。この点についての今後の研究の発展に期待したい見である。

2. 測定原理概要

電荷計測の原理は今このところ、電荷を電気的に測定する方法と、電荷に働く静電気力を測定する方法と大別される。この点では例えば、粒子電荷計測法に適用可能な光学的方法などが存在するなどと担当の専門家の話ではないかと思われるが、今見れば、是少ない研究例

キーワード：粒子、帯電、計測、ファラデーケージ

¹ 朝陽大学理工学部
 〒102-8577 東京都八王子市市川町 1-236
 Faculty of Science and Engineering, Soka University, 1-236,
 Tangi-cho, Hachioji, Tokyo 192-8577, Japan
² tatsushi@it.soka.ac.jp

静電気学会誌, 41, 2 (2017) 00-00

はあるものの¹、そのような方法が原理的・装置実面的に確立されるには至っていない。また、特殊な例として、粒子線ホログラフィーを用いて粒子周りの電場を可視化する方法なども開発されている²。しかしながら、必ずしも一般的に利用可能な方法とはいえない。電荷量を直接計測する方法ではないので、ここでは詳しくは立ち入らないことにする。

3. 光学的方法

3.1 定置型プローブによる方法

SPM (または KFM) などの微小光電顕微鏡を用いた電荷を帯電表面状態で測定し、プローブに誘導された電荷に働く静電気力を計測することによって(粒子)表面の電荷分布を計測する方法がいくつか試みられている。計測の空間分解能は基本的にはプローブの先端径で決まることが、実際にはプローブはその正面上に存在する電荷だけでなく周囲の電荷からも引力を受ける。プローブ先端電荷の位置関係による引力パターンを予め詳細に計算しておいた上で、引力計測結果とトナー粒子の表面電荷分布にデコンボリュート (逆計測) する方法が検討されている³。

また、関連する計測技術として「静電気力顕微鏡」の技術開発の詳細については本特集号別冊を参照されたい。

3.2 空気抵抗による方法

電場の中に置かれた電荷には以下の静電気力が働く。
$$F_e = qE$$
 (1)

この粒子が気体中で静電気力を受けて運動すると流体抵抗力が働く。気体との相対速度を v 、気体の粘度を μ 、粒子径を D (正しくは空気学相対径、つまり球形粒子としたときの直径) として、粒子に対する流体抵抗力は以下で与えられる。
$$F_f = \frac{3\pi\mu Dv}{2}$$
 (2)

2 (2) 静電気学会誌 第41巻 第2号 (2017)

ただしここで、 C はカニザム補正係数であり、空気中で粒子径が $1\mu\text{m}$ 以上ならばほぼ 1 として良い。

静電気力と流体抵抗力が釣り合うと加速度がゼロになるから粒子一定の速度 (終末速度) v で移動することになる。この等速運動の状態になるまでの時間を緩和時間と呼ぶが、これは小さい粒子では一般には未分り、従って、測定条件として電場 E を与えて粒子終末速度 v を計測できれば、以下のように、電荷 q は粒子径 D に対する比として得られる。

$$\frac{q}{D} = \frac{2\mu v}{3CE} \quad (3)$$

電場方向 (これを便宜上 x 方向とする) への粒子移動速度を計測する方法としては、静止気体中の重力、又は気体降伏流などを利用して電場と垂直な方向 (y 方向) への (既知の) 粒子等速運動を実現し、粒子位置情報から移動量 (y シフト) を計測することによって算出する方法とがある。あるいは、高速カメラやパルスレーザー-光学系を用いた PIV (Particle Image Velocimetry) によって粒子移動速度を直接計測する方法なども提案されている。

一例として図1に示す重力落下法では、粒子は重力による自由落下で鉛直方向に、電場により水平方向に移動する。粒子に対する流体抵抗はストークス域であれば、 x 方向と y 方向の流体抵抗はカップリングしないので独立に計算可能で、

$$r_x = \frac{2\mu v_x}{3CE} \quad (4)$$

$$r_y = \frac{2\mu v_y}{3CE} \quad (5)$$

となる。ただしここで、カニザム補正係数は $C=1$ としている。また、 ρ_p は粒子と空気の密度差、 μ は空気粘度、 g は重力加速度である。ここから球形粒子の直径 d を消去して、

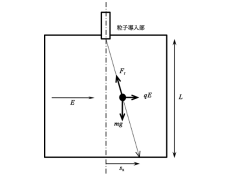


図1 重力落下法の概念図

$$\frac{q}{d} = \frac{2\mu v_y}{3CE} \quad (6)$$

により粒子比電荷を求めることができる。ここで、一直線走査の場合は、以上の議論から明らかのように、電場中の粒子速度 v を計測するシングルパルスマーク計測では、電荷 q と粒子径 D の情報を分離できないということである。電荷 q を求めるためには別途粒子径 D を決定する必要がある。

従って、電荷 q と粒子径 D を一つの計測から同時に求めるためには、何らかの2パラメータ計測が必然的に必要になる。例えば、交差電場を用いて粒子を空気中で振動させることにより、その振幅と外部振動電場との位相差を計測する2パラメータ計測などが提案されている。

3.3 ミリガン法

微小粒子の電荷測定についてはミリガン法が有名である。多少誤解されている場合もあるようであるが、ミリガンによる理論では「釣り合い条件」を使って電荷量を定めているわけではなく、重力定速度と電場による移動速度の比較を利用して、これによって測定が2パラメータとなり、粒子径の影響を排除することができる (または同時に粒子径を求めることができる)。空気中・重力場中で流体抵抗を受けて沈降する微粒子を考えると、これは鉛直上向き電場 E を印加して粒子を上昇するようにする。電場 $E=0$ のときの粒子沈降速度 (下向き) の速さを v_0 、電場 E が上向きに与えられたときの粒子上昇速度 (上向き) の速さを v とすると、それらの釣り合いの式は、

$$qE = \frac{2}{3} \rho_p g \Delta r + 3\eta v_0 \quad (8)$$

$$qE = \frac{2}{3} \rho_p g \Delta r + 3\eta v \quad (9)$$

を得る。バリエーションとして、電極電圧を上下反転して (電場の向きを保って向きを上下反転して) 粒子の上昇速度と下降速度を用いて同様の計算を行うものなどもある。最近では電極形状を工夫した発展形としての「電気力学天秤 (EDB: Electrodynamic Balance)」も開発され、研究に用いられている。ただし、本法は粒子1個をじっと観察する方法なので、大量の粒子をサンプリングして帯電量 (分布) を計測する用途には向かない。

粉体・粒子の帯電量計測法概論 (松山 達)

3 (3)

4. 電気的方法

電気的計測における直接測定量は電流または電位である。つまりとりあえずは電流計か電圧計の測定値を読むことになる (その後で何らかの計算等が必要になるかも知れない)。

4.1 導体の電荷計測

直接的計測対象となる帯電体が導体であるケースは希かも知れないが、後の議論の参考となるであろうから、帯電導体に対する電気的計測についてここで一度考えておくことにする。周囲から電気的に絶縁された状態の導体が帯電しているとすると、これとグラウンド (又は充分に大きなキャパシタ) との間に、電流計を接続すると、導体の電荷は全てグラウンドに流れる。この電流を時間積分すれば、導体の (元の) 帯電量が求まる。

一方、電流計の代わりに理想的電圧計 (内部抵抗が無限大であるような) を接続する場合を考える。導体表面は等電位条件を満たすのであるから、測定リードを計測対象物のどこに接続しても変わらない。このとき電圧計はグラウンドと帯電導体の間の電位差を示す。帯電導体とグラウンドの間の静電容量が判っていれば、電荷量 q は、

$$q = CV \quad (10)$$

によって定まる。ただしこの静電容量は、グラウンドと帯電導体の間の幾何学的関係によって変化する。周囲に他の物体があれば影響を受ける。つまり、静電容量はこうした「境界条件」の影響を受けるのであって、あまりに当然と思われるかも知れないが、帯電量が同じであっても電位は静電容量の変化 (幾何学的条件や周囲の条件の変化) によって変化する。

では、次に帯電体が絶縁体の場合を、導体の場合と比較して考えてみることにする。まず電流計を接続する場合、絶縁体なので、リードが接触した場所の電荷が流れないので測定できない。更にもう少しヤヤコシ事情を述べたならば、リードがグラウンドに接続された状態で徐々に帯電体近づけていくときに誘導電荷の分が流れる。なので、それも含まれた電流計で感受されるであろう電荷量は、必ずしもリードが接触した地点の帯電量と正確な等しいといえることにはならない。電圧計の場合は考えただけで済む。

従って、電気的計測にかけるためには、何らかの意味で計測値 (電流計や電圧計) を、どうしても最終的に「導体」に接続する必要がある。つまり絶縁体の帯電量を等価的に導体に「移す」必要がある。これを実現する方法が以下で述べるファラデーケージ法であるという位置付けになるわけなのである。

4.2 ファラデーケージ

ファラデーケージというのは言ってしまえばつまり単なる金属製の籠である。これで測定対象となる電荷を囲むことで、容器内全帯電量に対応する電荷を金属容器に等価的に「移す」ことができる。以下、図2を用いてファラデーケージの動作原理を説明する。

- (1) まず、閉じた2重の金属容器を用意する。それぞれが閉じていて、相互には絶縁されているものとする。
- (2) 内側容器に電荷 Q を入れる。この電荷 Q の容器での空間分布は全く問われない点が本法の最大の特徴である。以下で議論するように、電荷が内側容器に接触している必要もない (図2(a))。
- (3) この電荷 Q から出る電場は全て内側金属容器の内側の表面で誘導する。容器は導体なのであるから、容器内側の電場はゼロになる。ガウスの法則によって、この誘導電荷の総量が、容器内に投入された元の電荷 Q と等量異符号の電荷 $-Q$ になることが理解される (図2(b))。
- (4) 内側金属容器がもともと電荷中性であったとすると、電荷保存則により、誘導電荷 $-Q$ と等量異符号の電荷 Q が内側容器外側に誘導される (図2(c))。

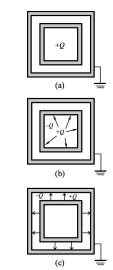
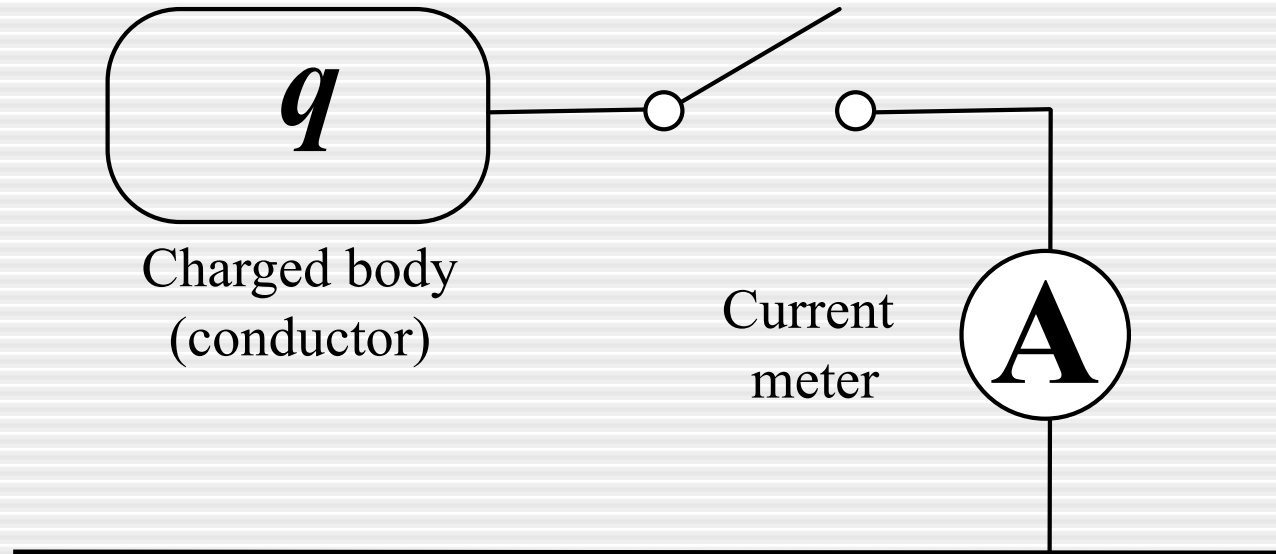


図2 ファラデーケージの概念図

Measurement of charge

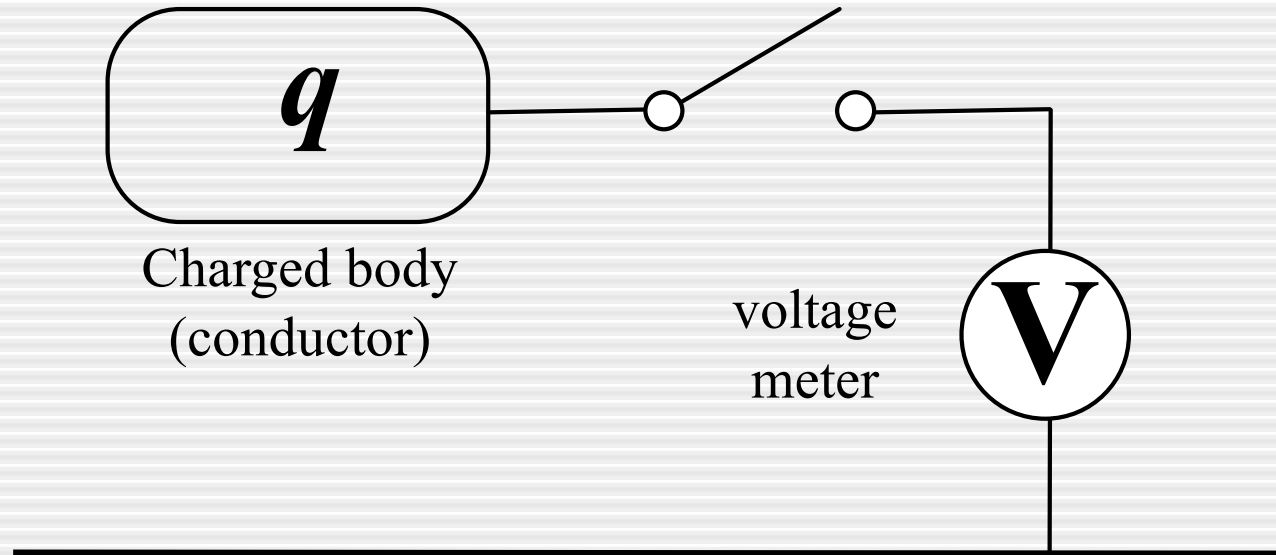
- ⊙ Electrical way
 - ⊙ Current measurement
 - ⊙ Voltage measurement
- ⊙ Dynamical way

A simple example

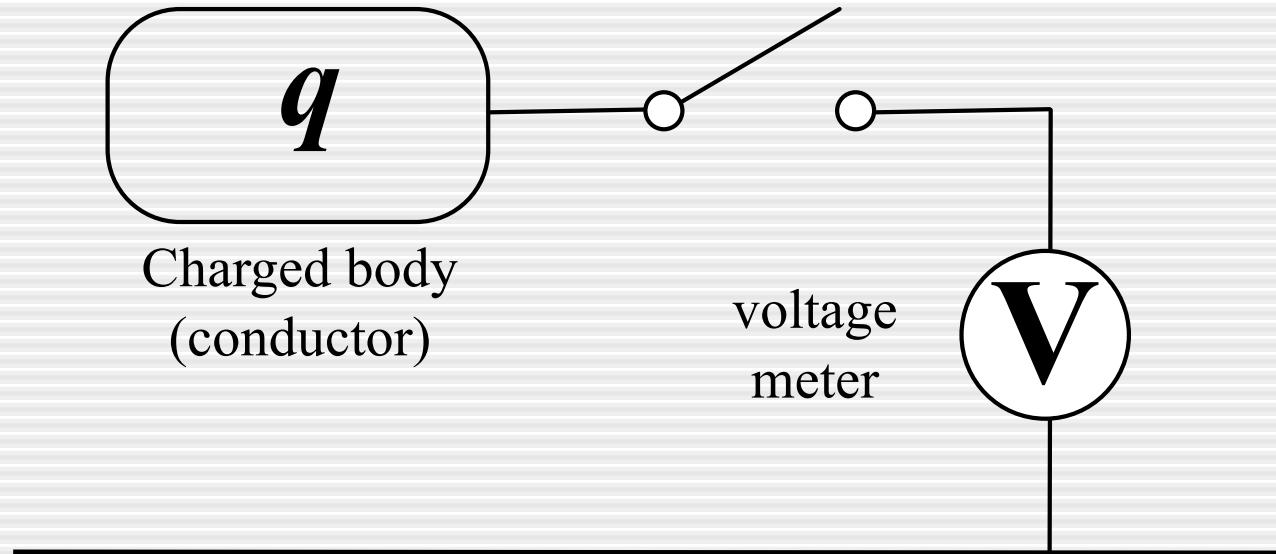


$$q = \int i dt$$

A case of voltage measurement

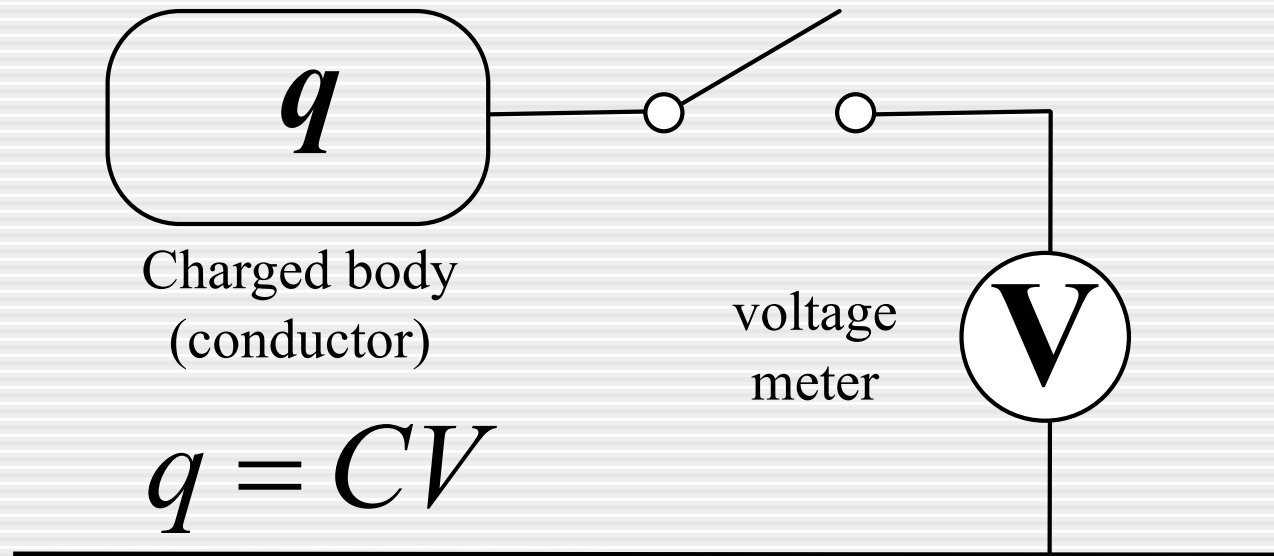


A case of voltage measurement



$$q = CV$$

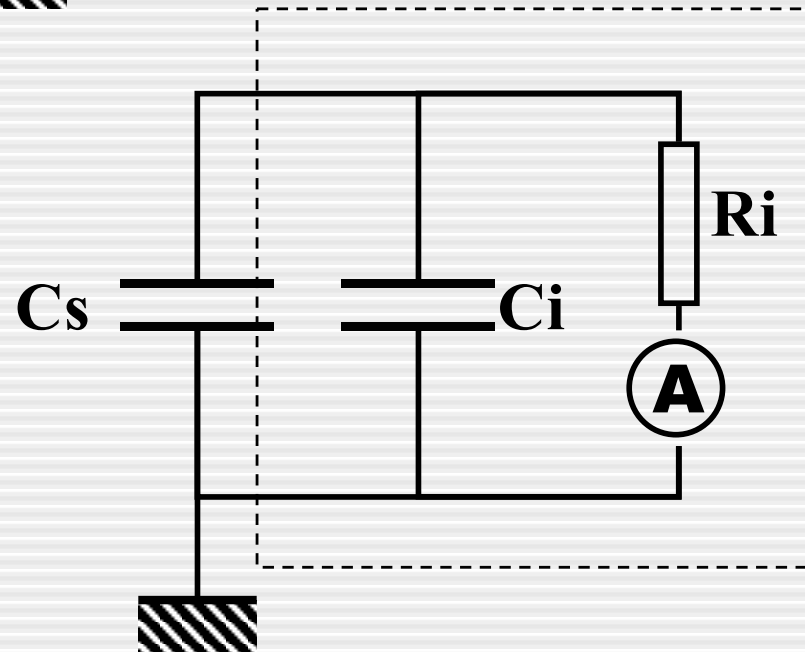
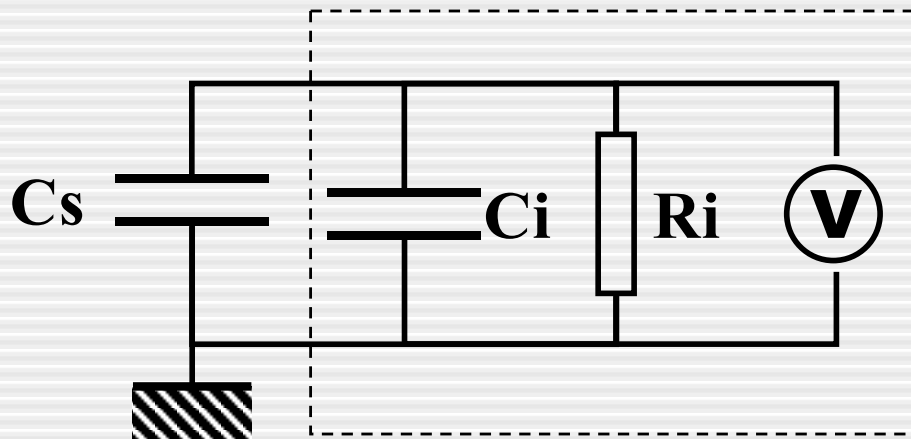
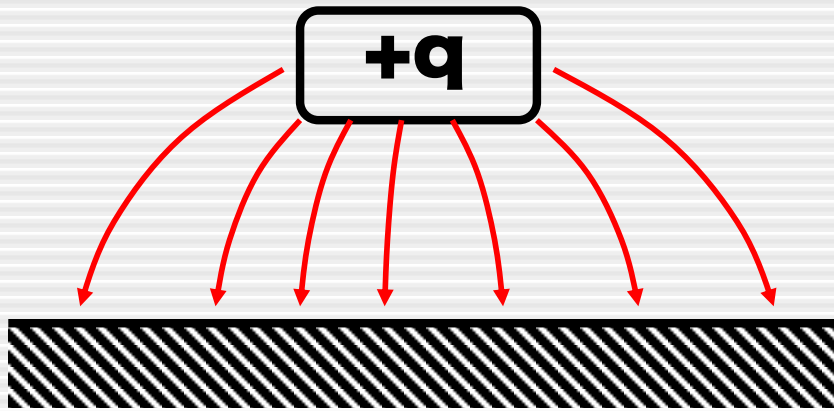
A case of voltage measurement



Note: Physical entity is charge.

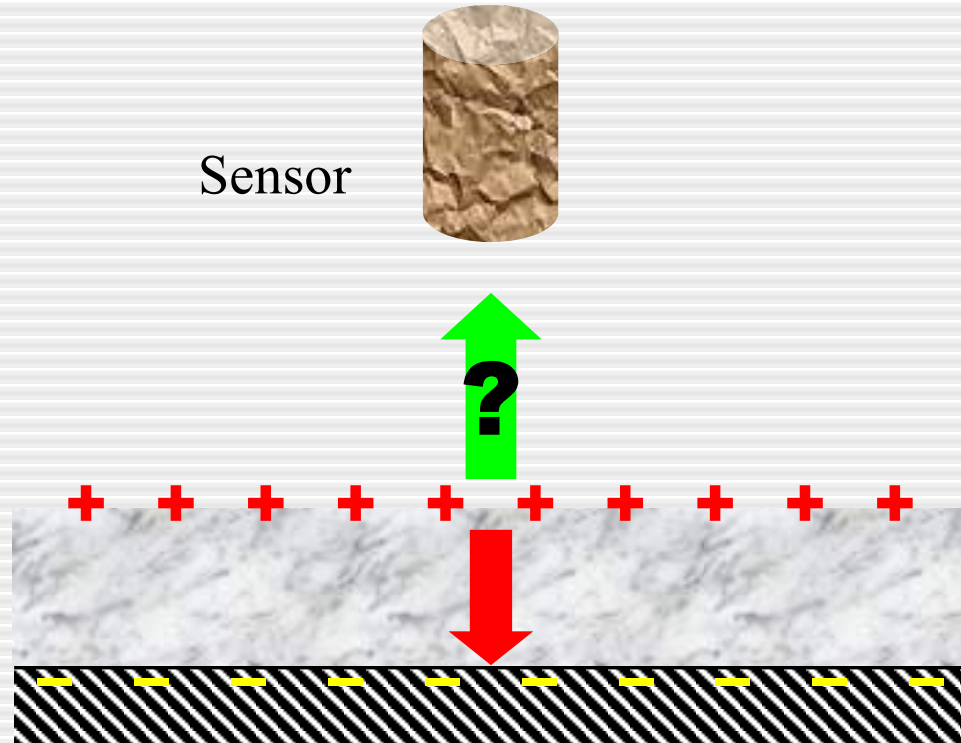
Voltage is determined by boundary condition (capacitance).

Conductor

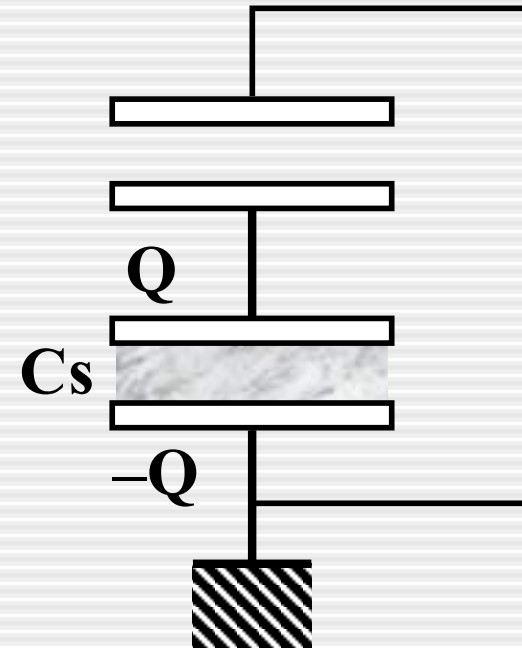


Note: Physical entity is charge.
voltage is determined by boundary condition.
(capacitance)

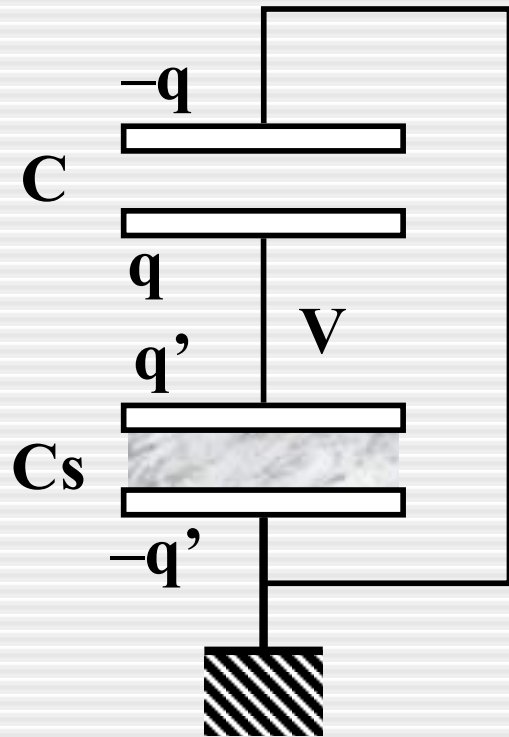
Surface potential measurement



Equivalent circuit

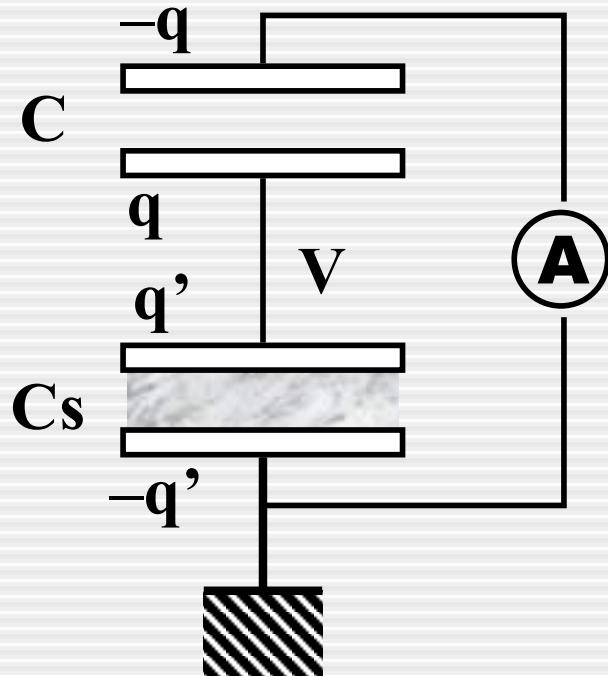


Equivalent circuit



$$Q = q + q'$$
$$V = \frac{q}{C} = \frac{q'}{C_s}$$

$$V = \frac{Q}{C + C_s}$$
$$q = \frac{C}{C + C_s} Q$$
$$q' = \frac{C_s}{C + C_s} Q$$



Supppose $C_s \gg C$,

$$q = \frac{C}{C_s} Q$$

Oscillate C

$$C = C_0(1 + A \sin \omega t)$$

$$q = \frac{C_0 Q}{C_s} (1 + A \sin \omega t)$$

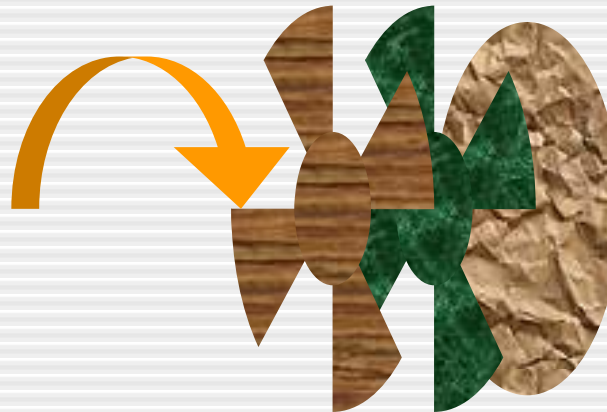
$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{C_0 Q}{C_s} \omega A \cos \omega t$$

How to oscillate C

S-oscillation



**Chopper
(Field “mill”)**

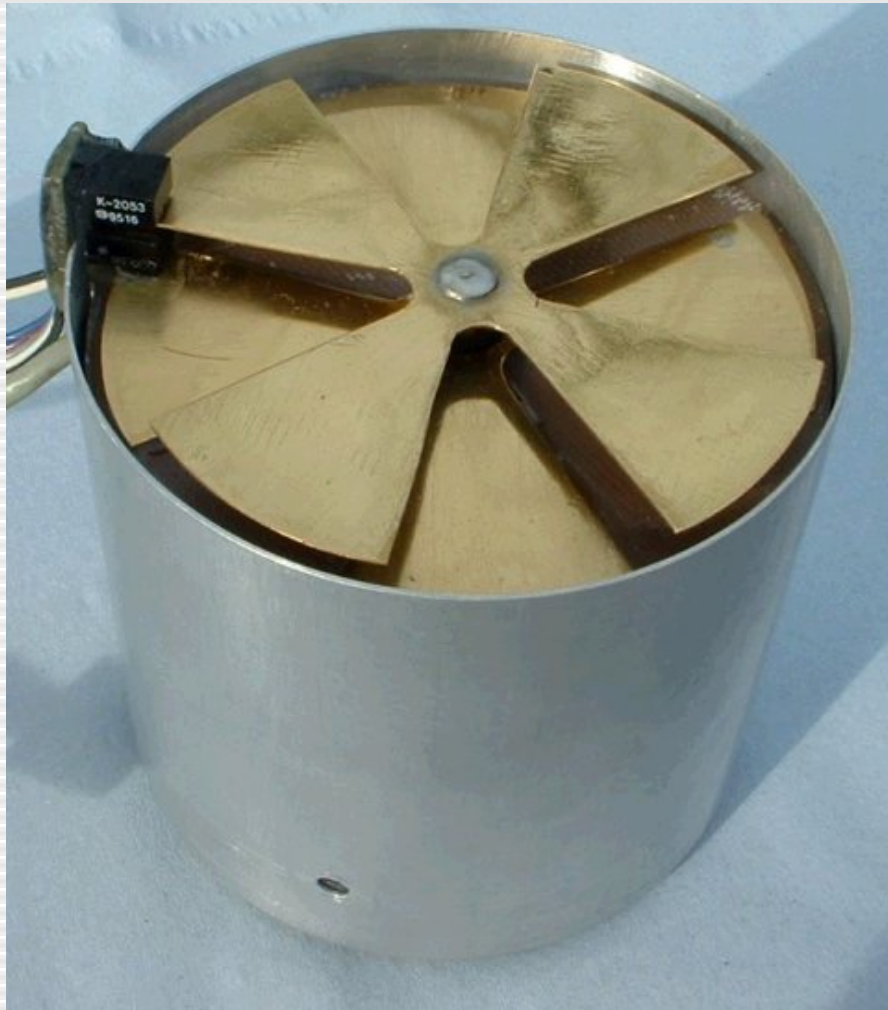


d-oscillation



C_0 is determined by the distance between the surface and sensor.

Field mill

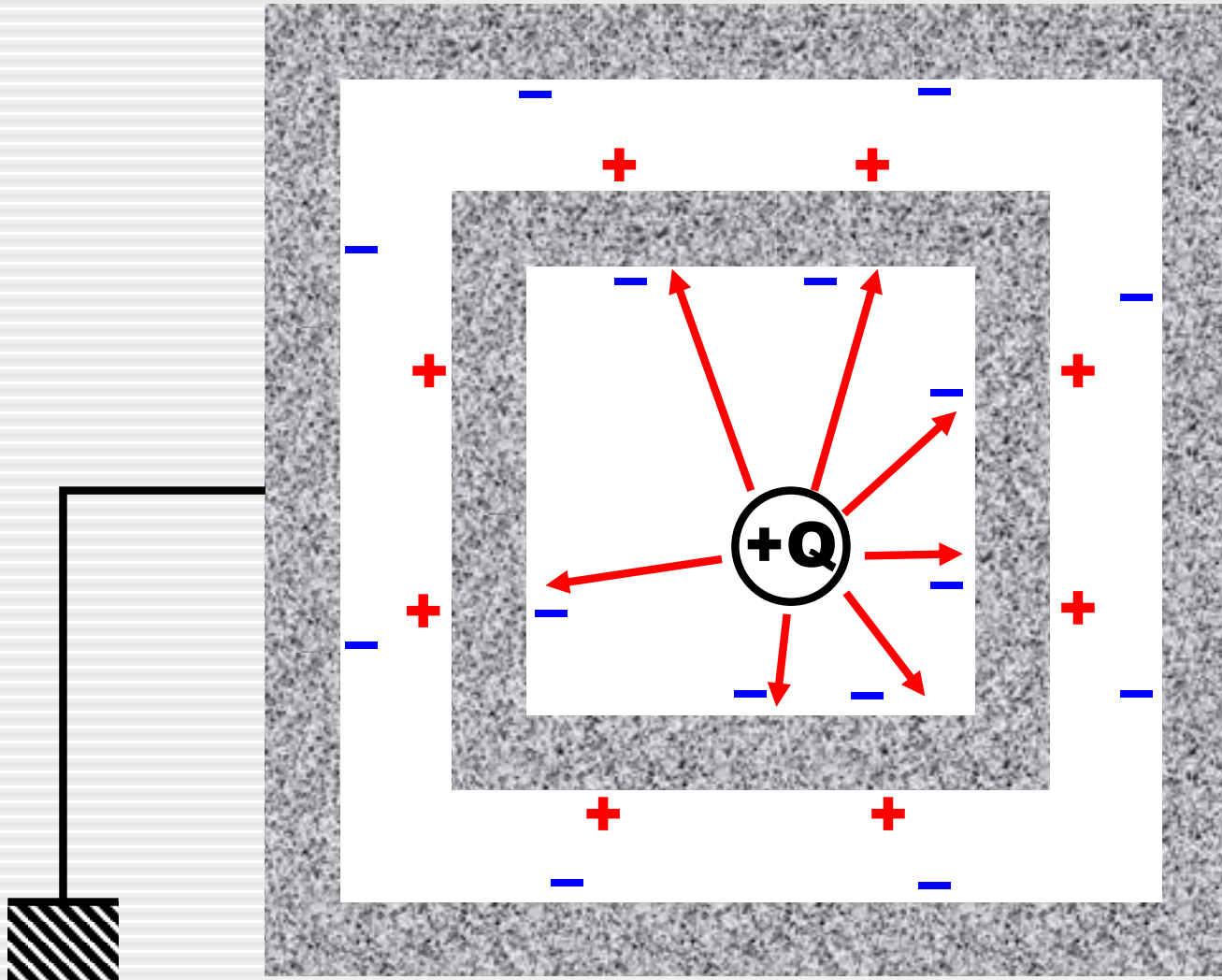


Surface potential meter

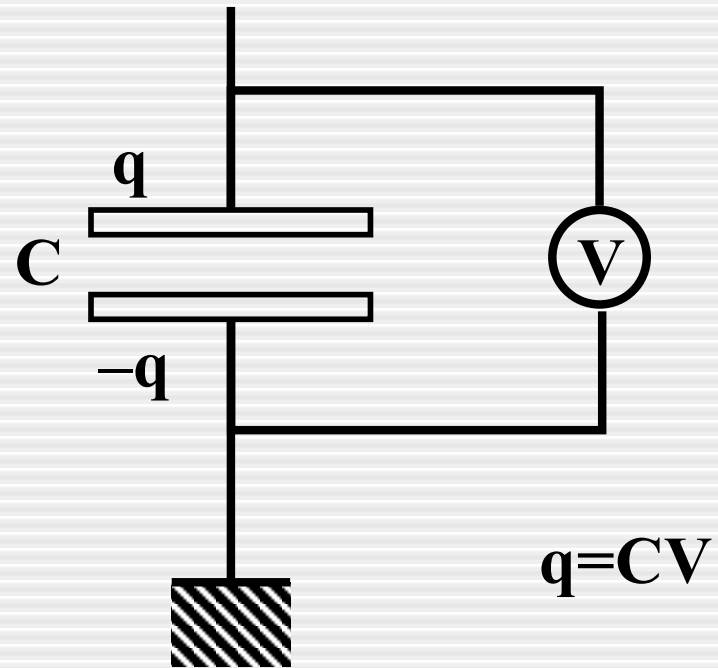
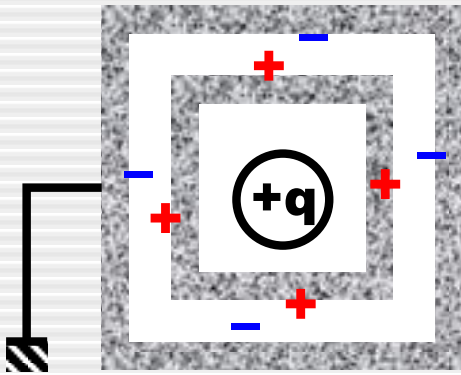
@widely available in market.

@much smaller measurement heads are available in modern models.

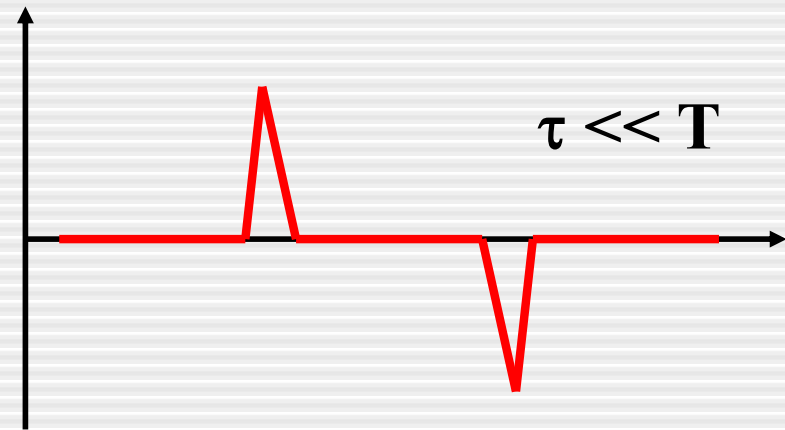
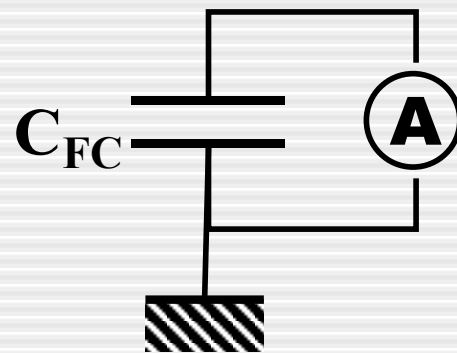
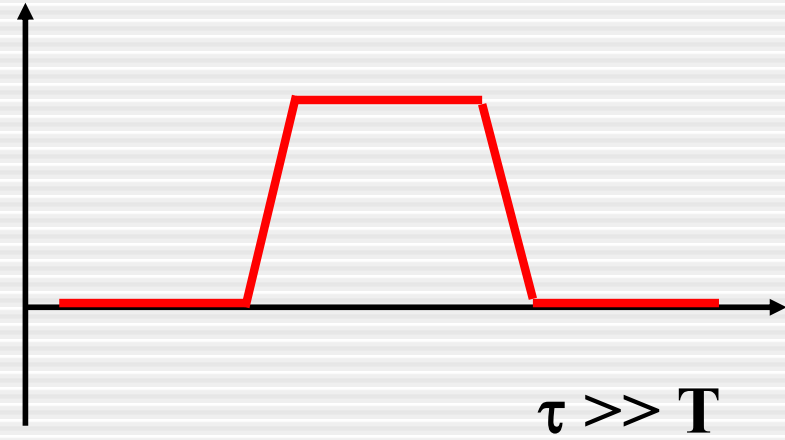
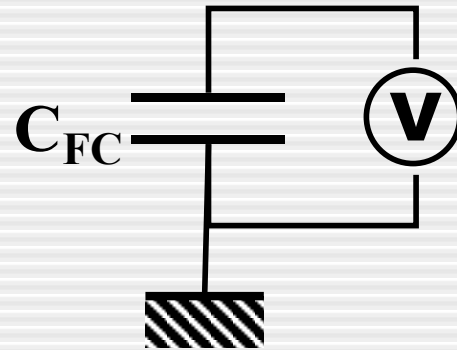
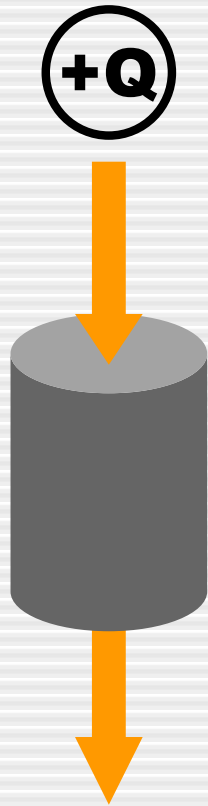
Principle of the use of Faraday-cage



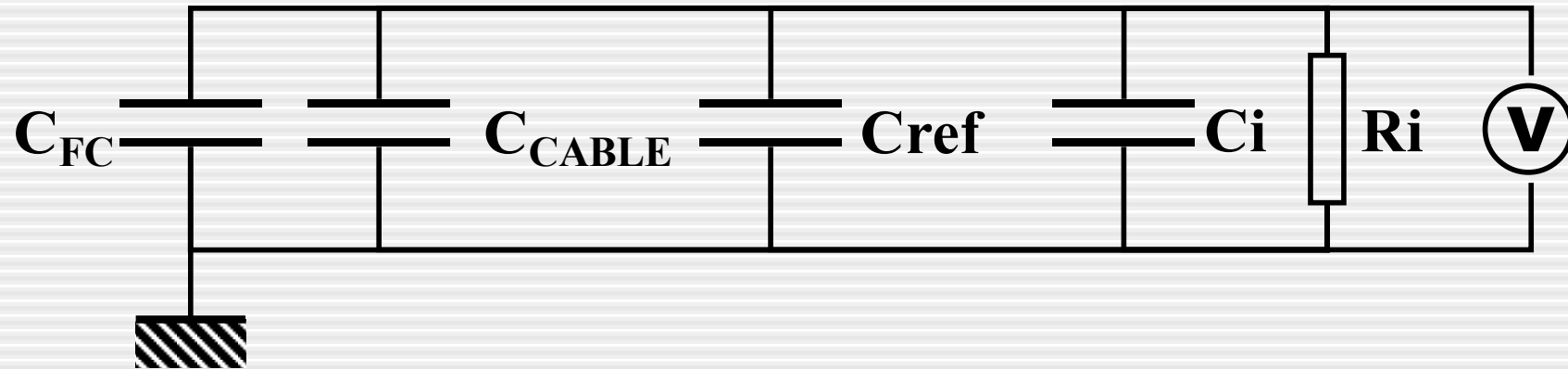
(always) think about the equivalent circuit



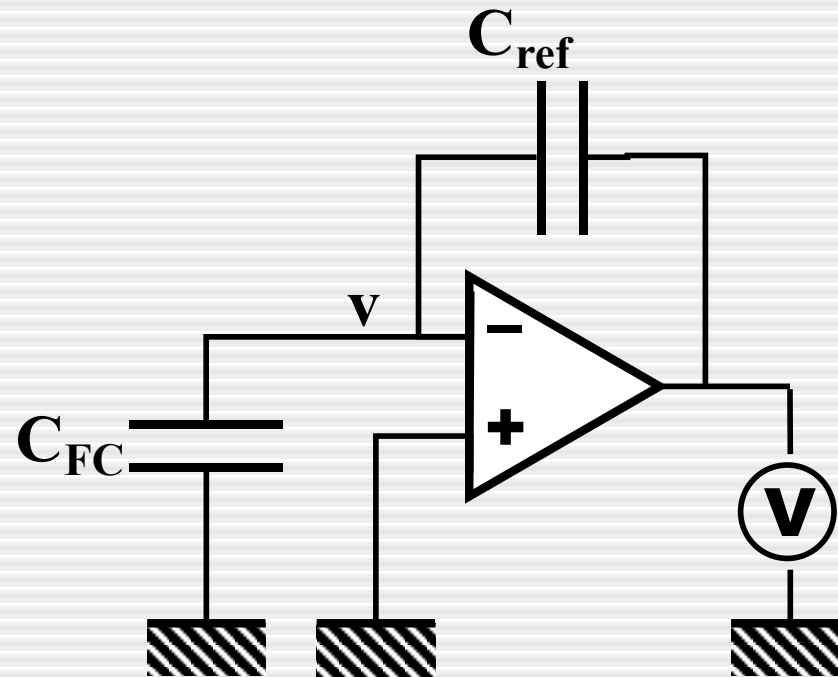
Response of FC

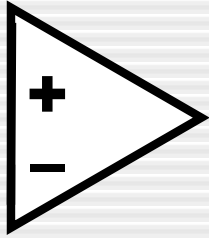


Actual connection to V meter from FC



Feedback Charge Amplifier (charge-voltage converter)



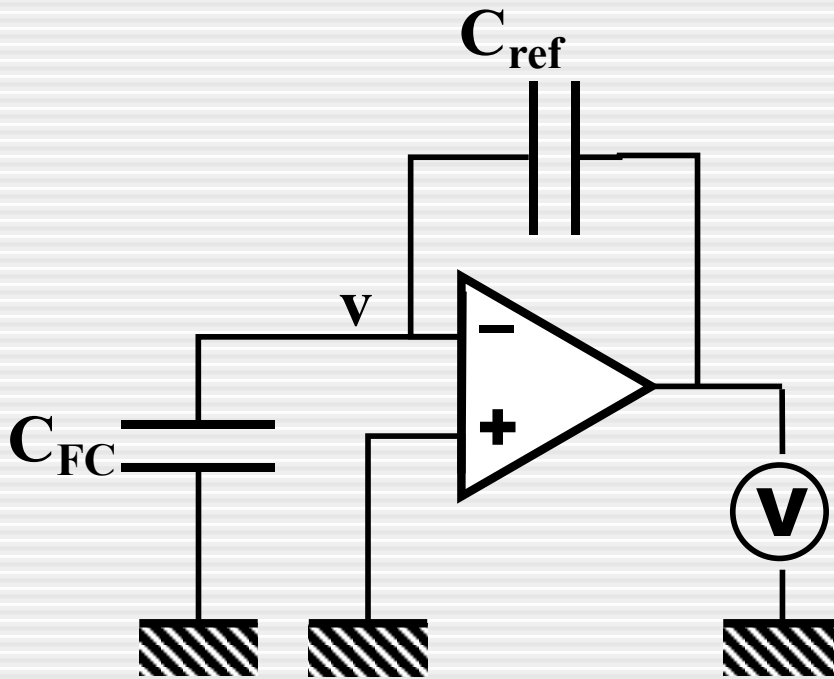


$$V_{out} = A \cdot (v_{+} - v_{-})$$

“ideal” op. amp.

- Ⓢ Infinite gain
- Ⓢ Infinite input impedance
- Ⓢ Null output impedance
- Ⓢ No noise
- Ⓢ No leakage current
- Ⓢ No frequency dependency

Feedback Charge Amplifier (charge-voltage converter)



$$V = -Av$$

$$q = C_{\text{ref}}(v - V)$$

$$= C_{\text{ref}} \left(-\frac{V}{A} - V \right)$$

$$\approx -C_{\text{ref}} V$$

$$V = -\frac{q}{C_{\text{ref}}}$$

$v \approx 0$: virtual ground

Faraday-cage



Technology Institution of Industrial Safety

- ⊙ Highly precise multimeter
 - ⊙ with charge measurement mode (charge amp.) (option)
- ⊙ low input impedance for current measurement
- ⊙ high input impedance for voltage measurement

6517B Electrometer/High Resistance Meter Datasheet



Key Features

- Measures resistances up to $10^{18} \Omega$
- 10 aA ($10 \times 10^{-18} \text{ A}$) current measurement resolution
- Complete hardware-software solution for ASTM D257 high resistivity measurements with the 6517B, 8009 Resistivity Test Fixture, and the KickStart High Resistivity Measurement Application
- $<3 \text{ fA}$ input bias current
- 6½-digit high accuracy measurement mode

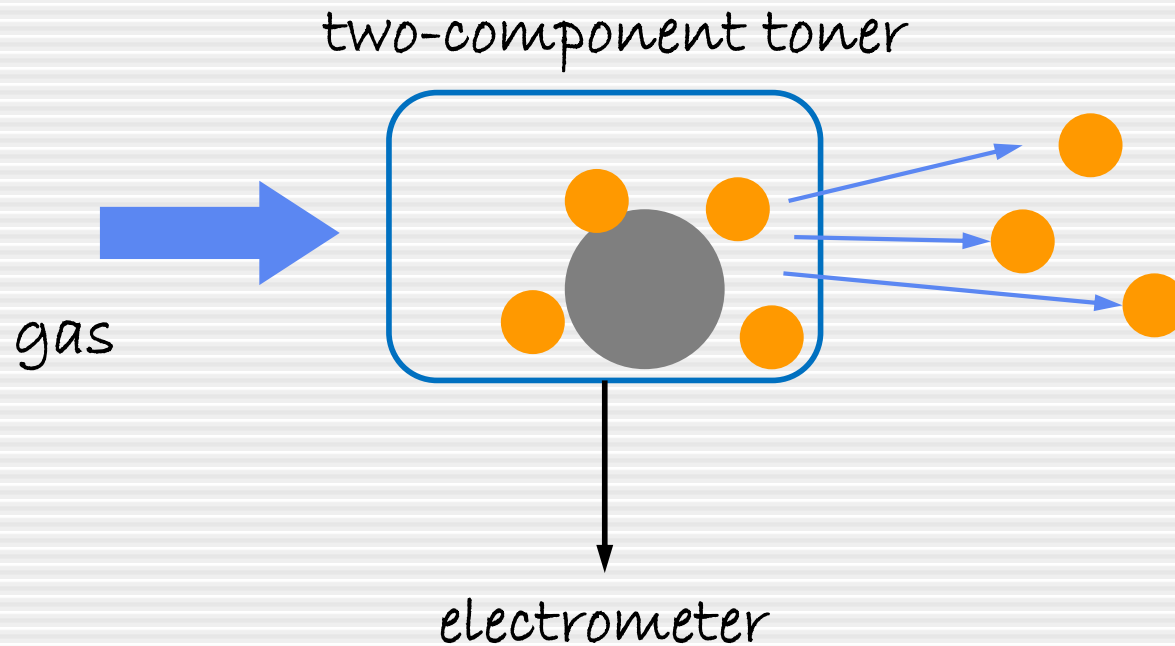
Wide Measurement Ranges

The 6517B offers autoranging over the full span of ranges on current, resistance, voltage, and charge measurements. The 6517B combines the following measurement capabilities:

- Ultra-sensitive ammeter with current measurement from 10aA to 20mA
- Highest impedance voltmeter with voltage measurement from $1\mu\text{V}$ to 200V
- Ultra-high range ohmmeter with resistance measurement from 1O to 1018O
- Sensitive coulombmeter with charge measurement from 1fC to $2\mu\text{C}$

How to put powder in, or out? — sampling is always the matter

Blow-off method



Example of commercially available equipment

Model 212HS Charge-to-Mass Ratio (Q/m) Test System



Trek's Charge-to-Mass Ratio System (Model 212HS) is a portable Q/m analyzer that utilizes the "draw-off" toner transfer method to provide repeatable, highly accurate toner/powder charge measurements. Due to its small size and weight, the instrument is highly portable, making it an excellent choice for use directly on the production line or in the laboratory.

The TREK Model 212HS system employs a unique specimen separation and transfer technique that avoids the creation of measurement errors due to the undesired additional charging of test specimens sometimes caused by the rapid air movement associated with "blow-off" type measurement systems. The unit is configured as a separate main indicator unit, a plug-in sample cell unit, and a plug-in absorption nozzle unit to allow for different configurations in response to various user applications. A two position switch selects pump strength for normal or high application needs, such as for measuring charge on single component toners (when stronger suction is required).

All measurement data is displayed on a front panel read-out and is available as analog voltage data on output 1 (absorption nozzle data) and output 2 (sample cell data) rear panel BNC connectors. Data can be temporarily stored to on-board system memory with the push of a button and then saved more permanently to a personal computer.

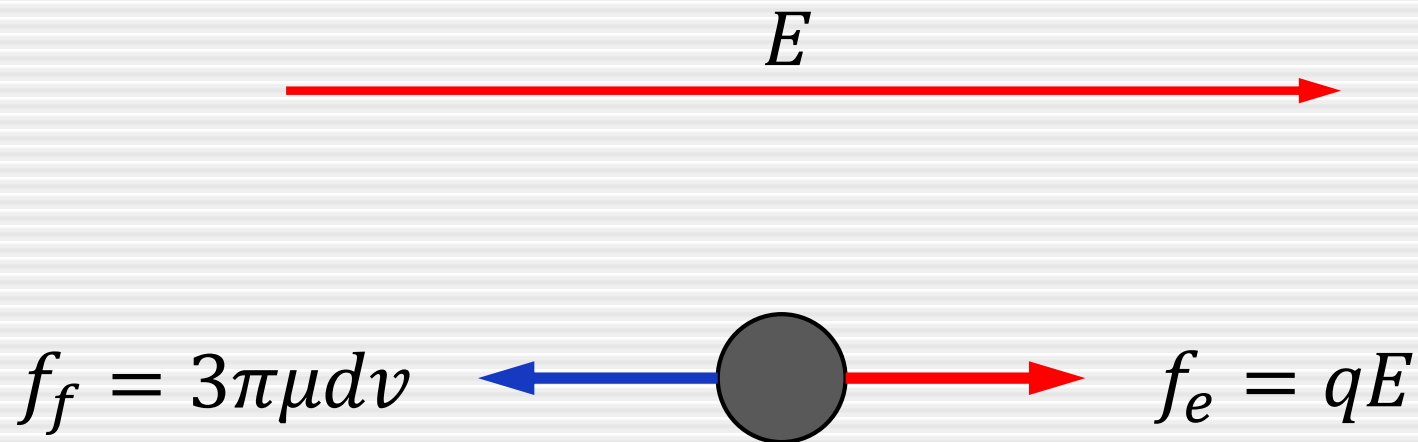
NOTE: Measuring toner/powder mass requires the use of a weigh scale which is not included with this Charge-to-Mass Ratio Test System.



Measurement and Power Solutions™
www.trekinc.com

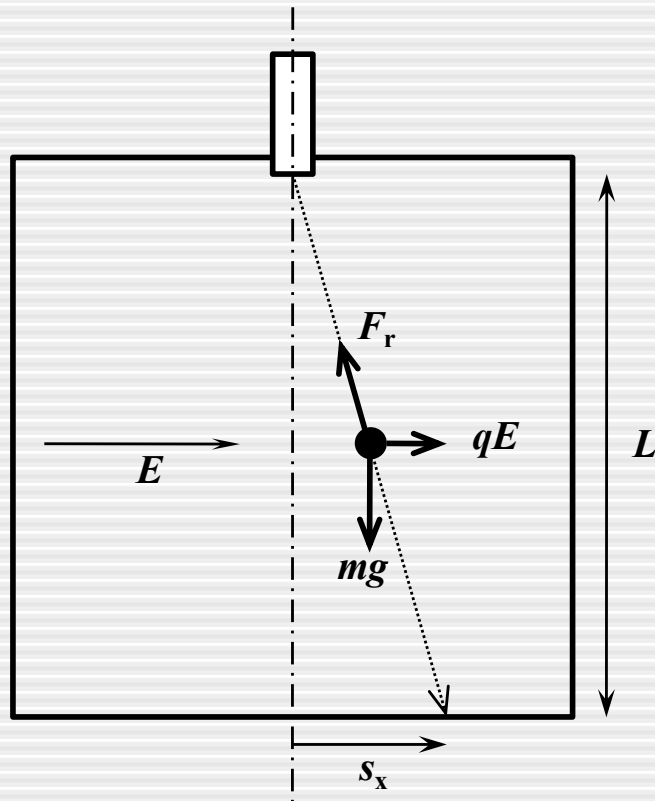
- A Q/m analyzer that avoids the creation of measurement errors associated with traditional "blow-off" measurement techniques
- Accurately determines the charge-to-mass ratio characteristics of electrophotographic toners or other powders
- Designed to handle single and dual component toners
- Employs a unique specimen separation and transfer technique
- Measurement Data memory function equipped
- Able to store data to a PC through the USB terminal
- RoHS compliant (EU)
- CE compliant





$$\frac{q}{d} = \frac{3\pi\mu v}{E}$$

An example of two-parameter measurement



Forces:

⊙ Electrostatic force

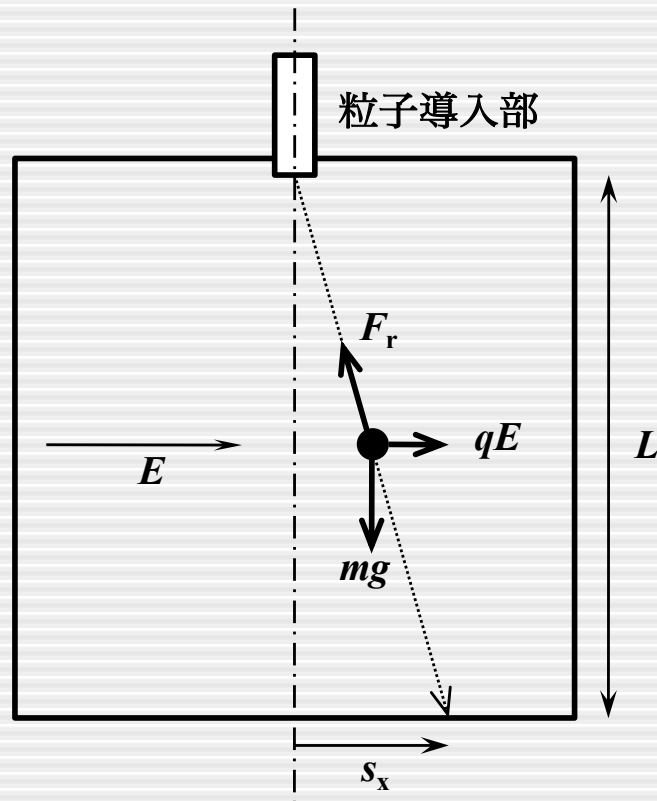
$$f_e = qE$$

⊙ Fluid resistance (Stokes)

$$f_r = 3\pi\mu d v$$

⊙ Gravity

$$f_g = mg$$



Forces:

⊙ Electrostatic force

$$f_e = qE$$

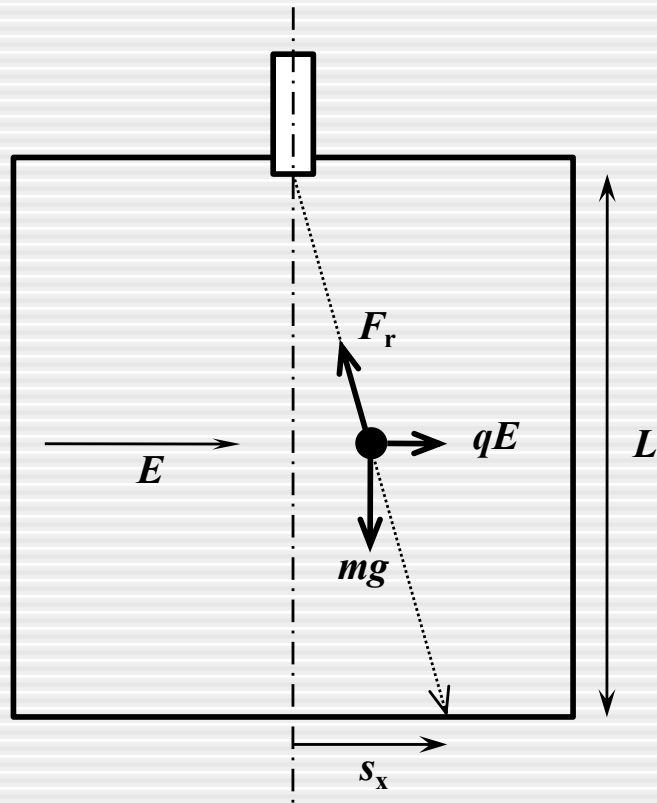
⊙ Fluid resistance (Stokes)

$$f_r = 3\pi\mu d v$$

⊙ Gravity

$$f_g = mg$$

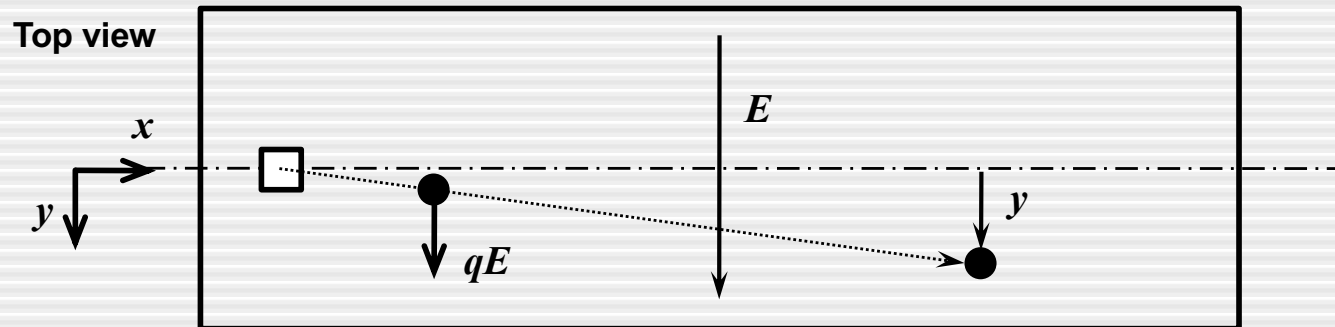
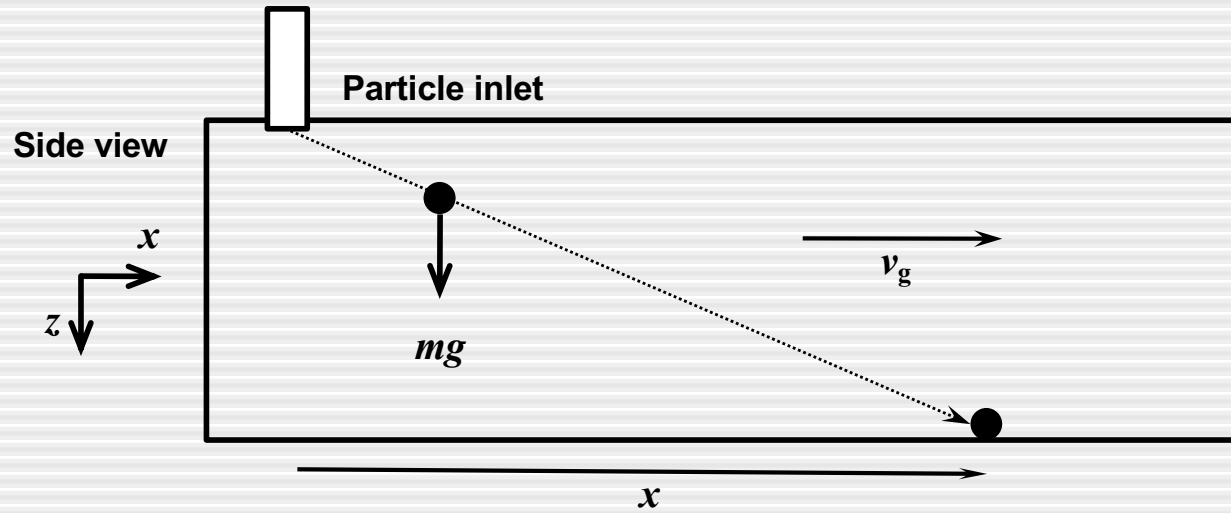
Dynamic Method



$$v_x = \frac{qE}{3\pi\mu d}$$

$$v_y = \frac{mg}{3\pi\mu d}$$

Dynamic Method



Example of commercially available equipment

EPPING
PES-Laboratorium

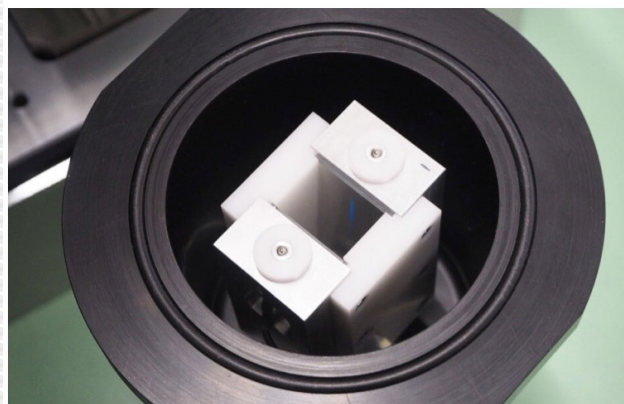
The charge spectrometer q/d-meter



q/d-meter – Charge spectrometer

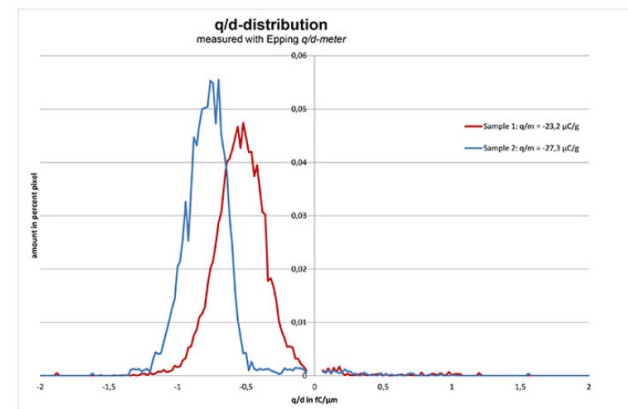
The charge spectrometer q/d-meter (former q-test) measures the charge distribution q/d in fC/ μ m of dry particles. The distribution provides more detailed information about the charging characteristics of the particles. It determines the quantity of wrong signed particles and the low -high charging properties. This information is essential during the R&D of new materials and components and to understand the process.

The measurement principle used is an indirect method based on the deflection of a charged particle in an electric field. The deflection is related to the charge, and respectively the charge to diameter ratio of the particles.



Standard measurement head with toner deposition

The glass slides are automatically scanned in the parscan device. The deposition points of the particles are used to calculate their q/d values. Particle diameter can also be evaluated when particles are separated on the glass, means they should not touch each other.



Available results include the

- q/d distribution (charge per diameter of the particles)
- q distribution related to diameter q(d)
- q/d distribution related to diameter q/d(d)
- q/d² distribution (charge per surface area)
- q/m distribution (charge per mass)

“diameter distribution (number and volume)”

<https://www.epping-pes.de/our-products/qd-meter/>

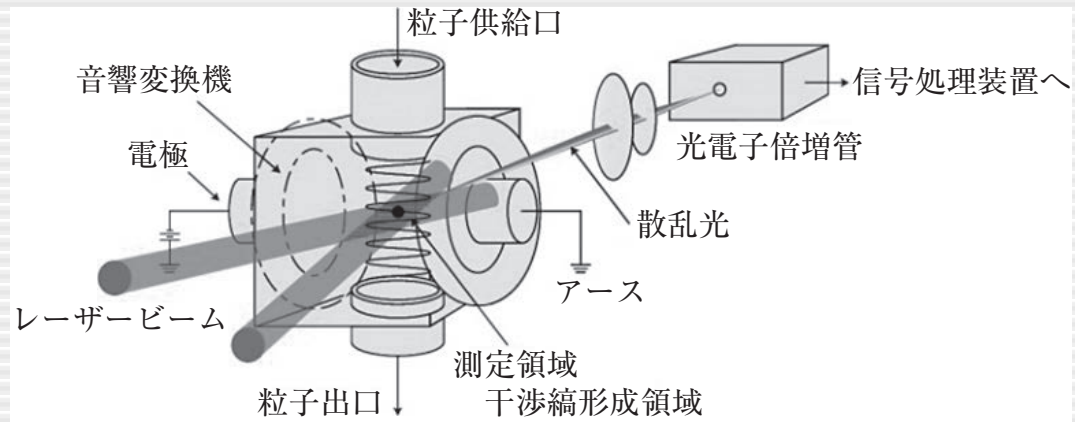


図1 測定セル内の音響場と電場と粒子の挙動

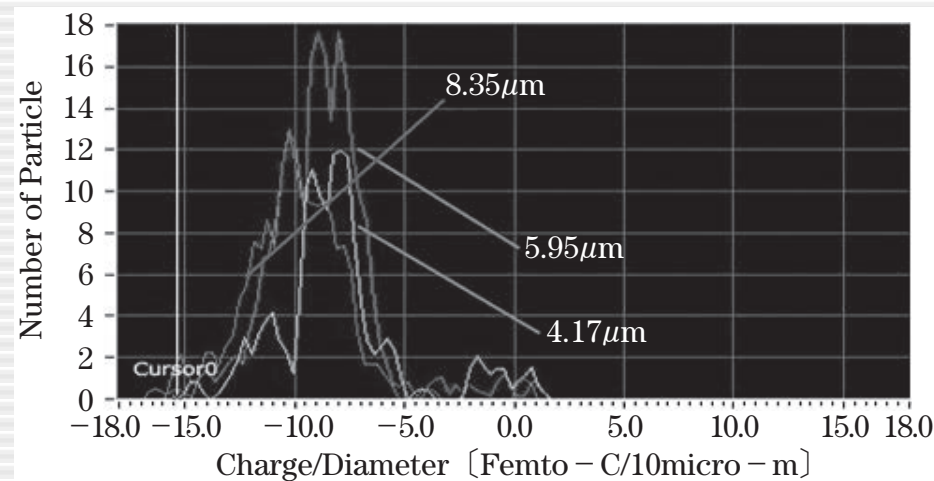


図2 負極帯電トナーの粒子径別帯電量分布

http://www.hosokawamicron.co.jp/jp/files/items/2095/File/202010_kgs.pdf

Summary

- ② sampling is challenging always.
- ② otherwise in-situ measurement.

Other techniques

Ⓢ KFM

Ⓢ Colloid probe

Ⓢ Levitation

Ⓢ More ideas are needed!!

questions