

検出器

南條 創
(大阪大学)

立場

- 実験の設計
 - 物理の要求 -> 検出器の設計
 - 難しい測定、実験のアイデア <-> 検出器の性能
 - 原理、性能をリミットしているもの -> 動作のイメージ
 - 安定な動作 <-> 限界性能
 - 相反する要求
- 運用,解析
 - 物理の要求 -> 検出器の特徴
 - 測定の限界、系統誤差
 - 較正
 - 分解能, 応答の直線性

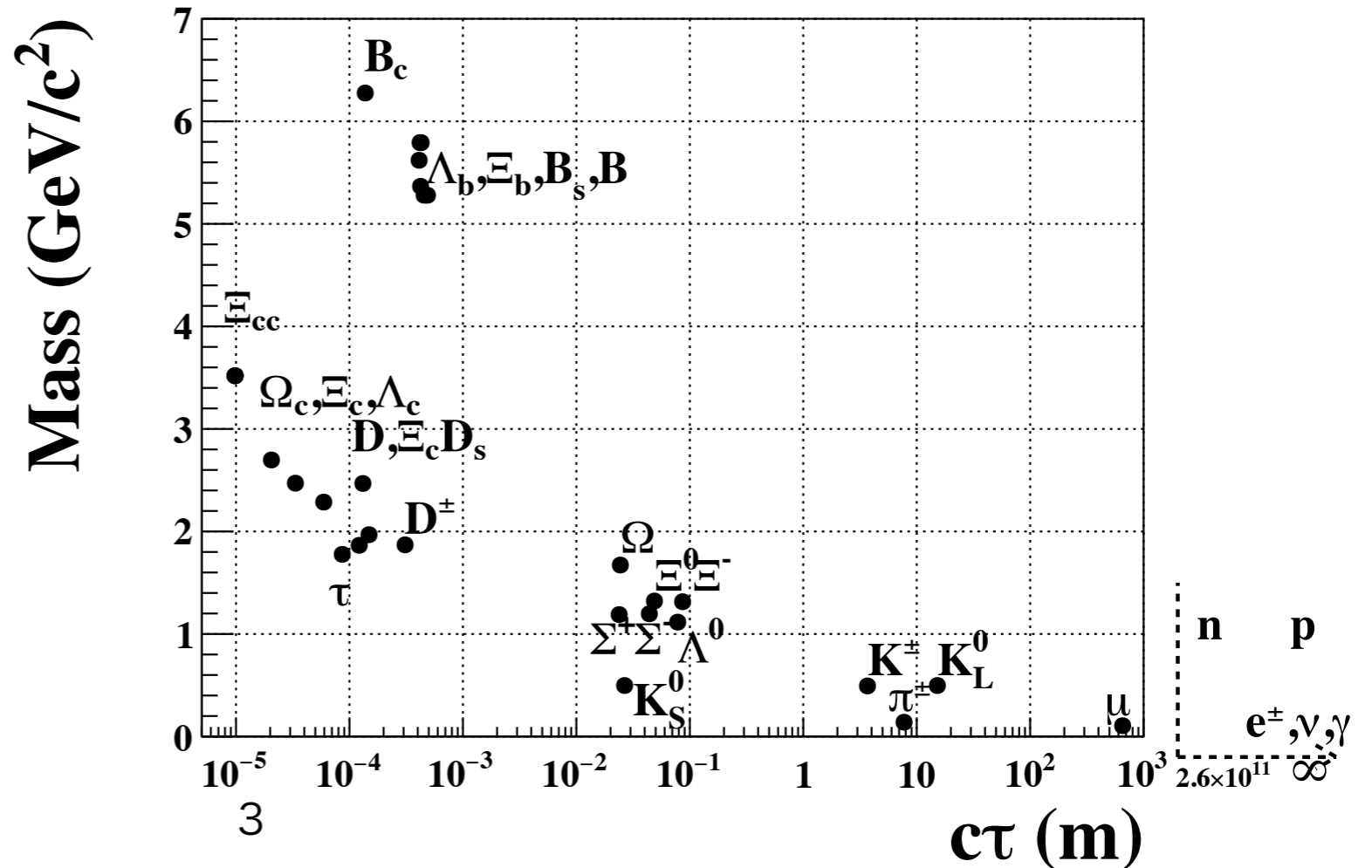
何を？

- 粒子

- 測定：エネルギー、時間、位置 (運動量は?)
- 同定：粒子の種類(PID : Particle ID)
 - 波形、エネルギーの行き先(発光、発熱、イオン化…)
 - 測定量のコンビネーション

- 分類

- 荷電粒子
 - 検出器と直接電磁相互作用
- 中性粒子(γ, ν, n)
 - 相互作用、崩壊で荷電粒子へ

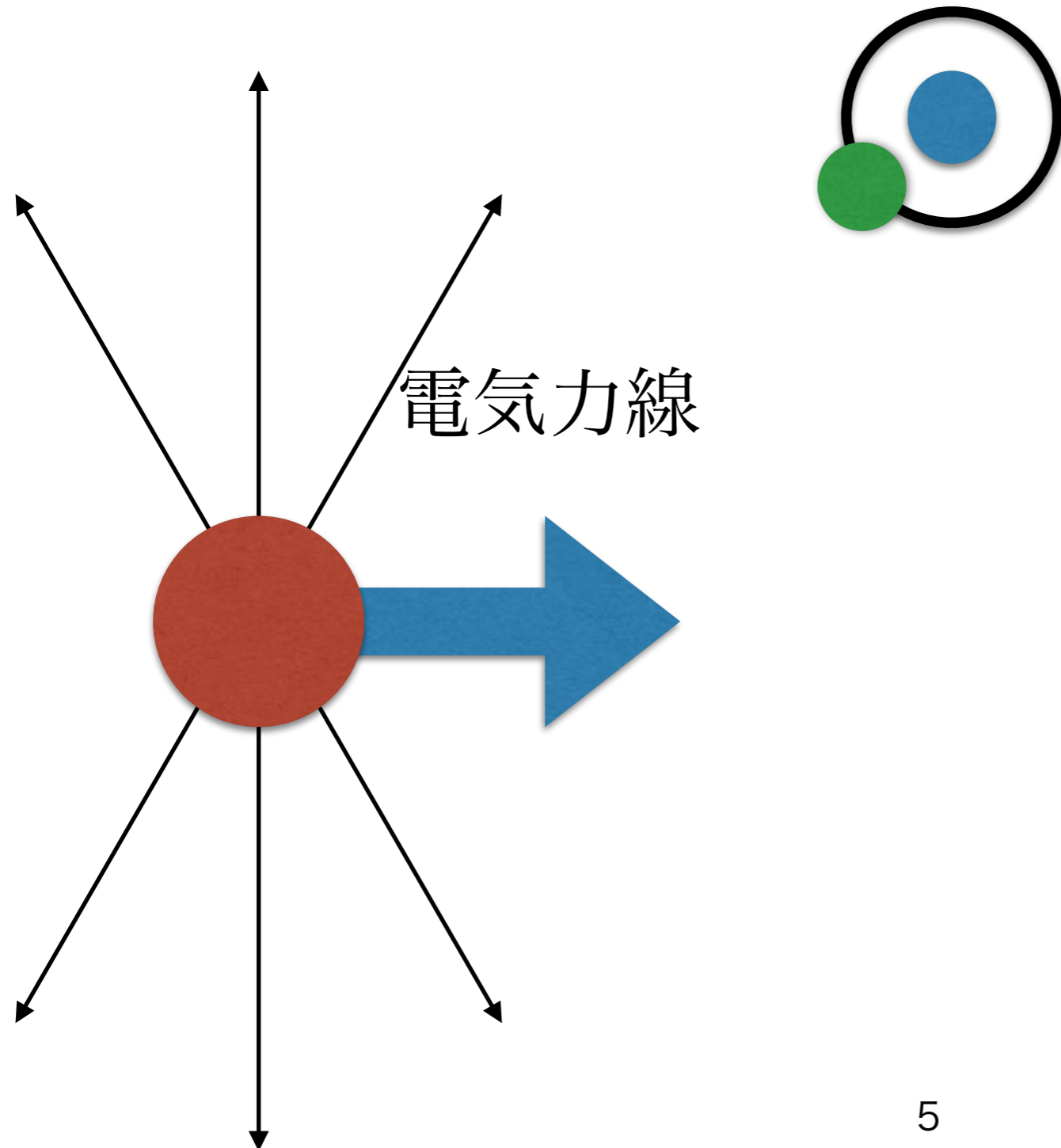


検出器

- 物質
- 電磁相互作用
- エレクトロニクス

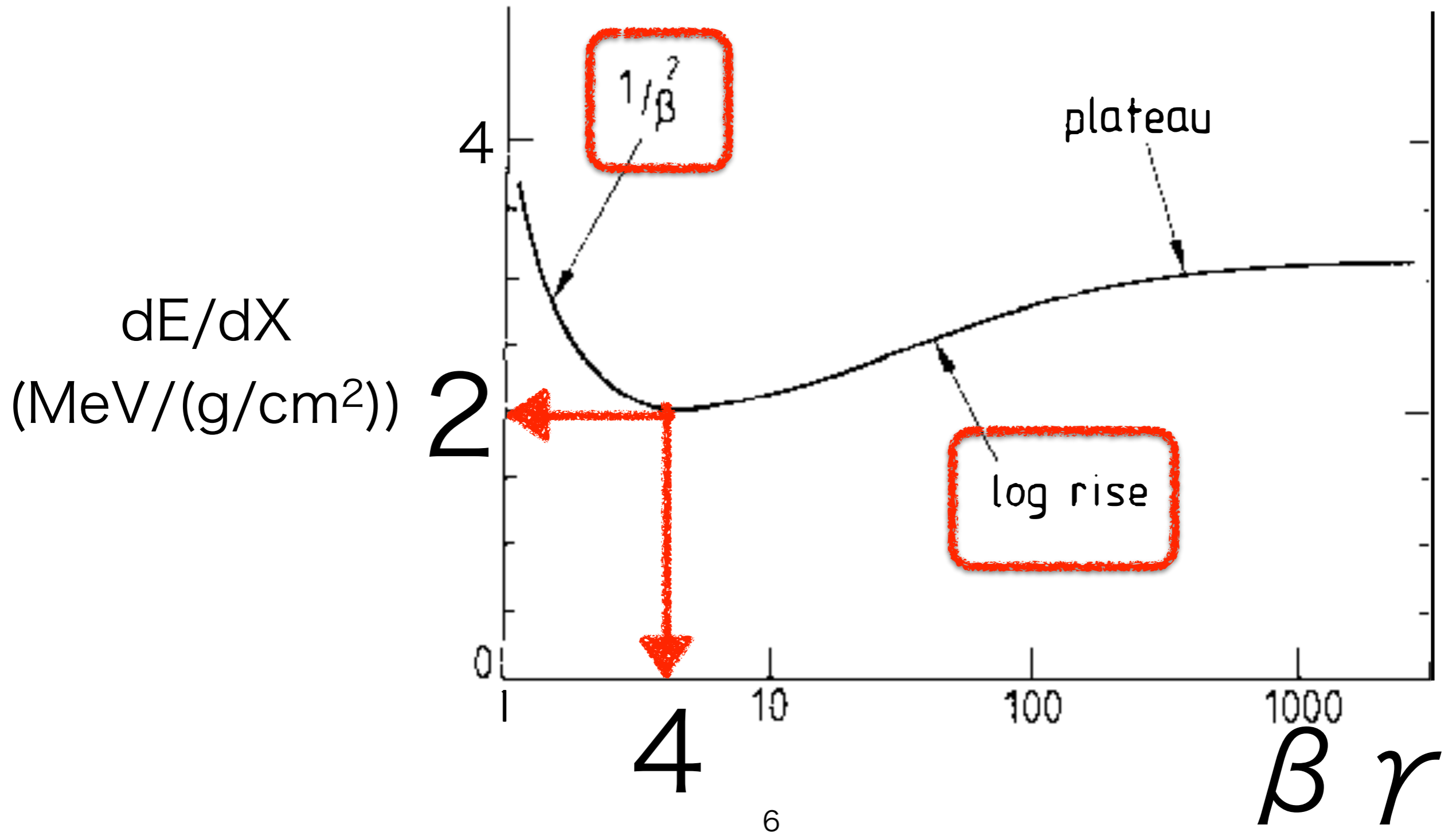
荷電粒子

- 検出器:物質 <—電磁相互作用—> 荷電粒子

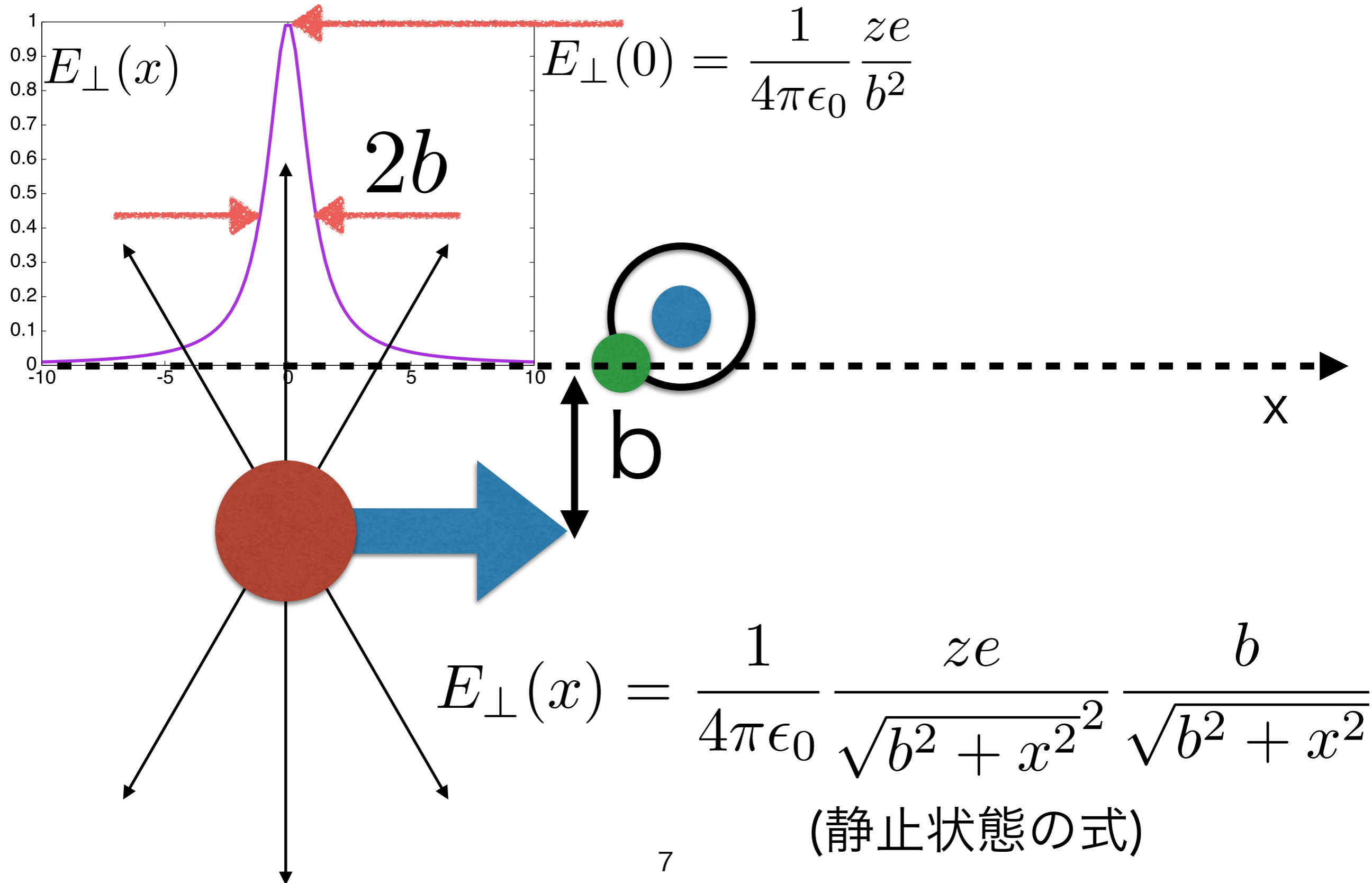


dE/dX

- エネルギー損失 / X: 質量長さ (g/cm²)



電子の感じる電場？

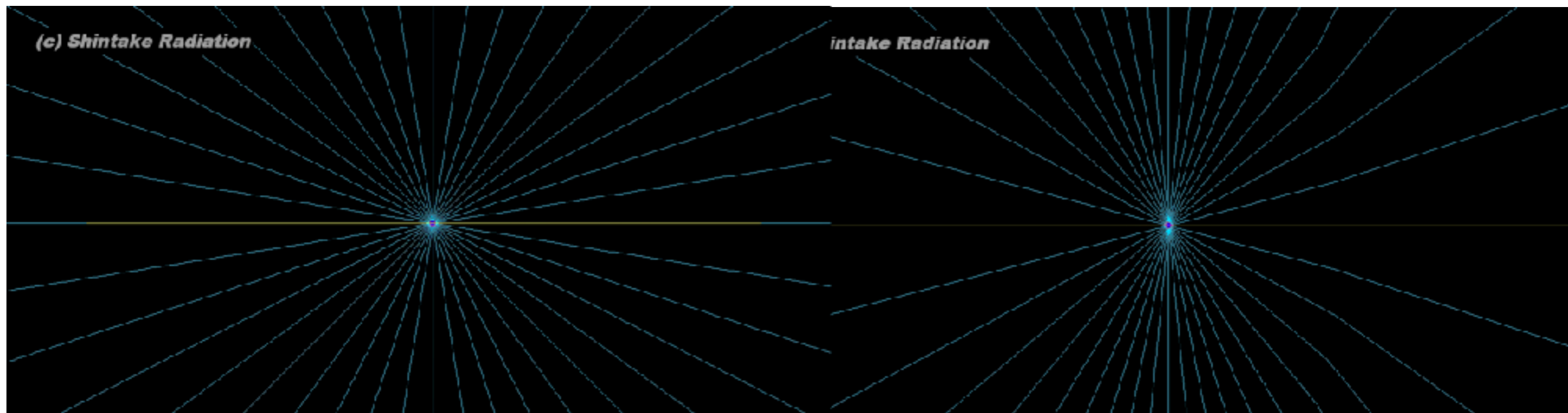


高速荷電粒子の電気力線

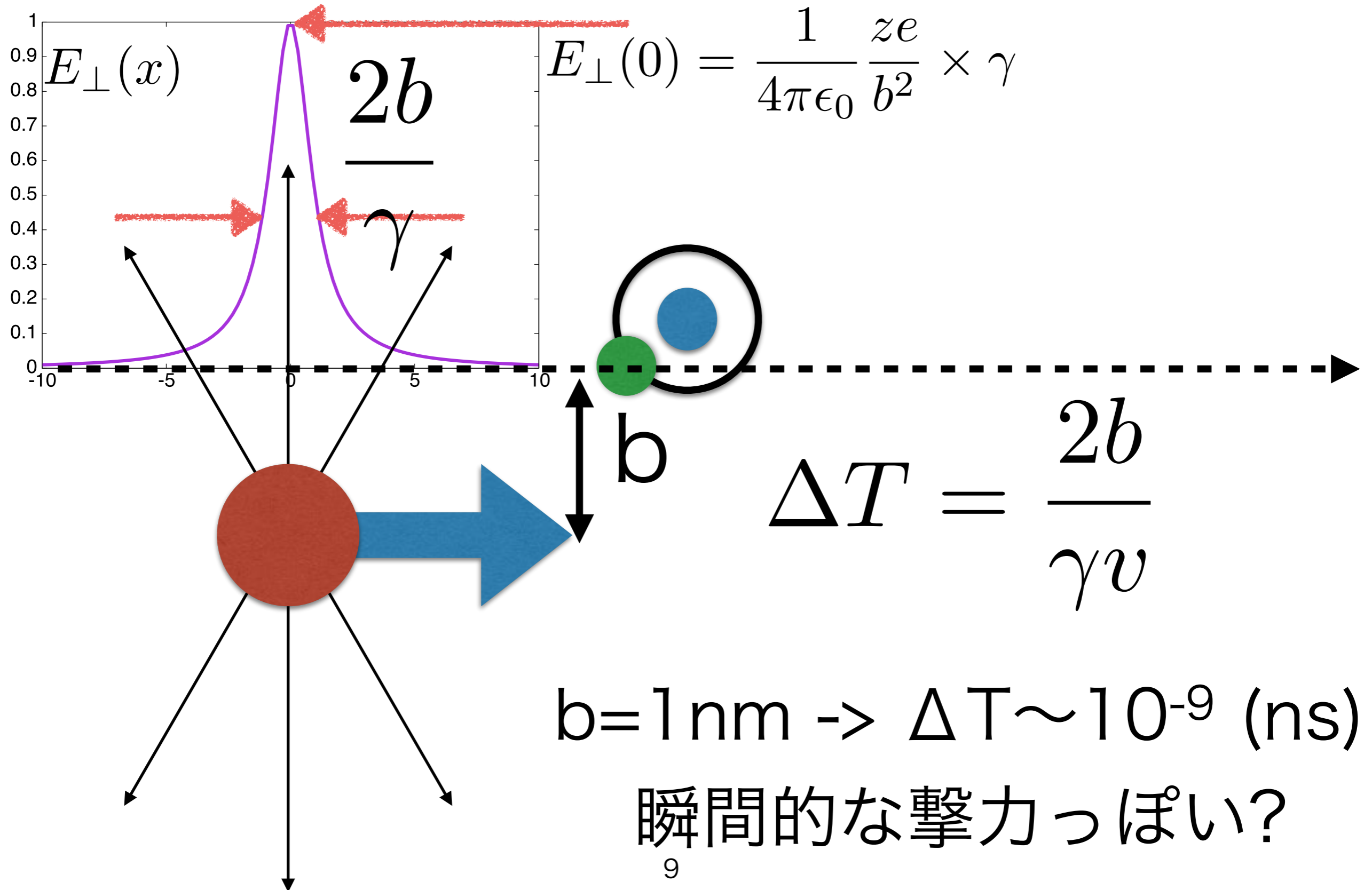
- 進行方向に $1/\gamma$ ローレンツ収縮
- 電場 = 電気力線密度 \rightarrow 強度 γ 倍、広がり $1/\gamma$

$$\beta = 0.08$$

$$\beta = 0.8$$



電子の感じる電場？

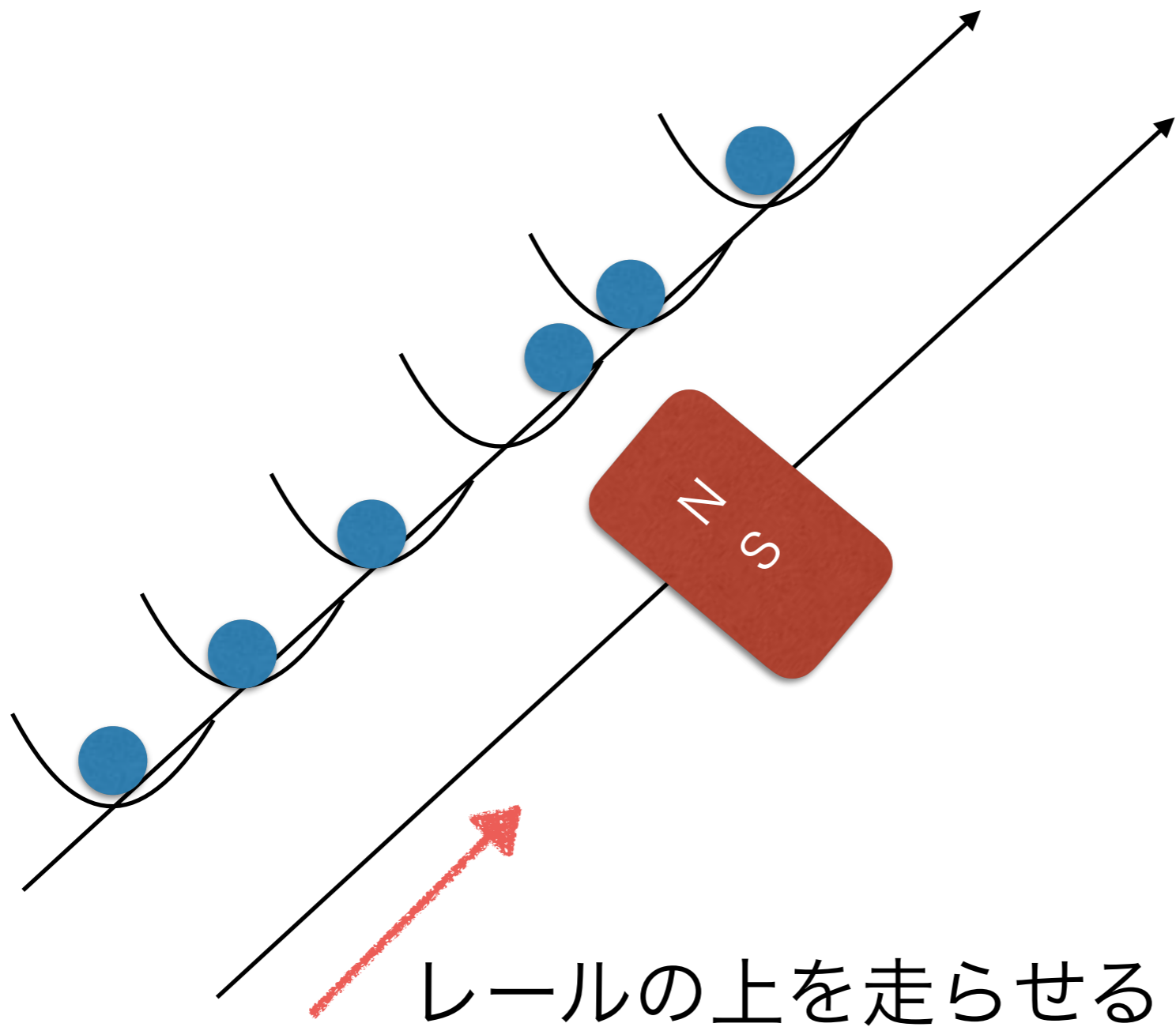


無限遠方の電子まで効く？

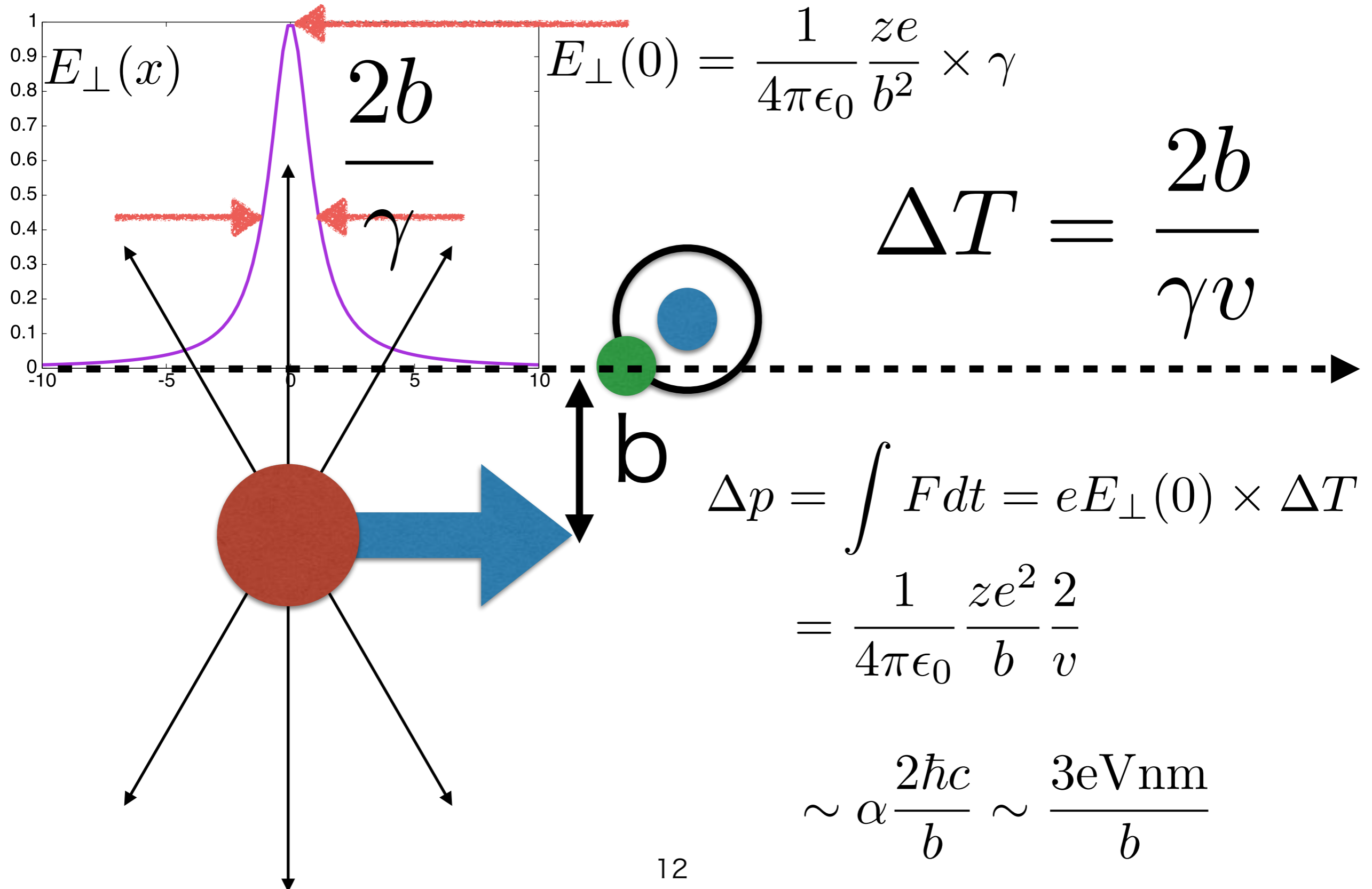
- 軌道電子の典型的な時間(周回時間)
 - $Z=6$ (Carbon)
 - $I=6*10\text{eV} = h \nu \rightarrow T \sim 2\pi \frac{200\text{eV nm}}{60\text{eV/c}} \sim 20\text{nm/c} \sim 10^{-7} \text{ ns}$
- にくらべて $b=1\text{nm}$ での撃力の時間スケールは短い
- b の大きいところ 20nm くらいだとコンパラ。 \rightarrow 撃力っぽくない。原子を励起しにくくなる。

$$\Delta T = \frac{2b}{\gamma v} < \frac{h}{I} \sim \frac{1000\text{eV nm}}{Ic}$$

$$b_{max} = \frac{h}{2I} v \gamma \sim \frac{600\text{eV nm}}{I} \gamma$$



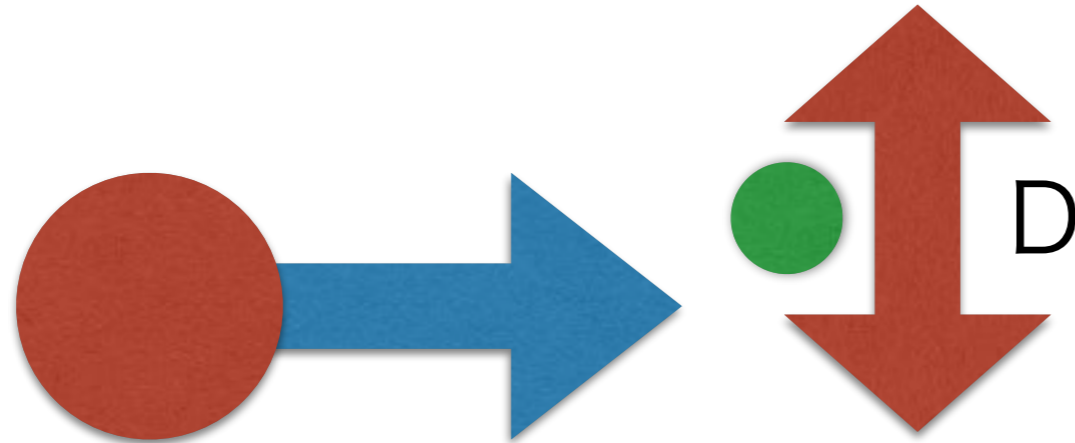
電子の感じる運動量キック



近すぎるのも問題

- $\Delta p \sim 3\text{eV}$ ($b=1\text{nm}$) \rightarrow ちょっとしたキック

- 一方で $b \rightarrow 0$ で発散 $\Delta p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ze^2}{b} \frac{2}{v}$

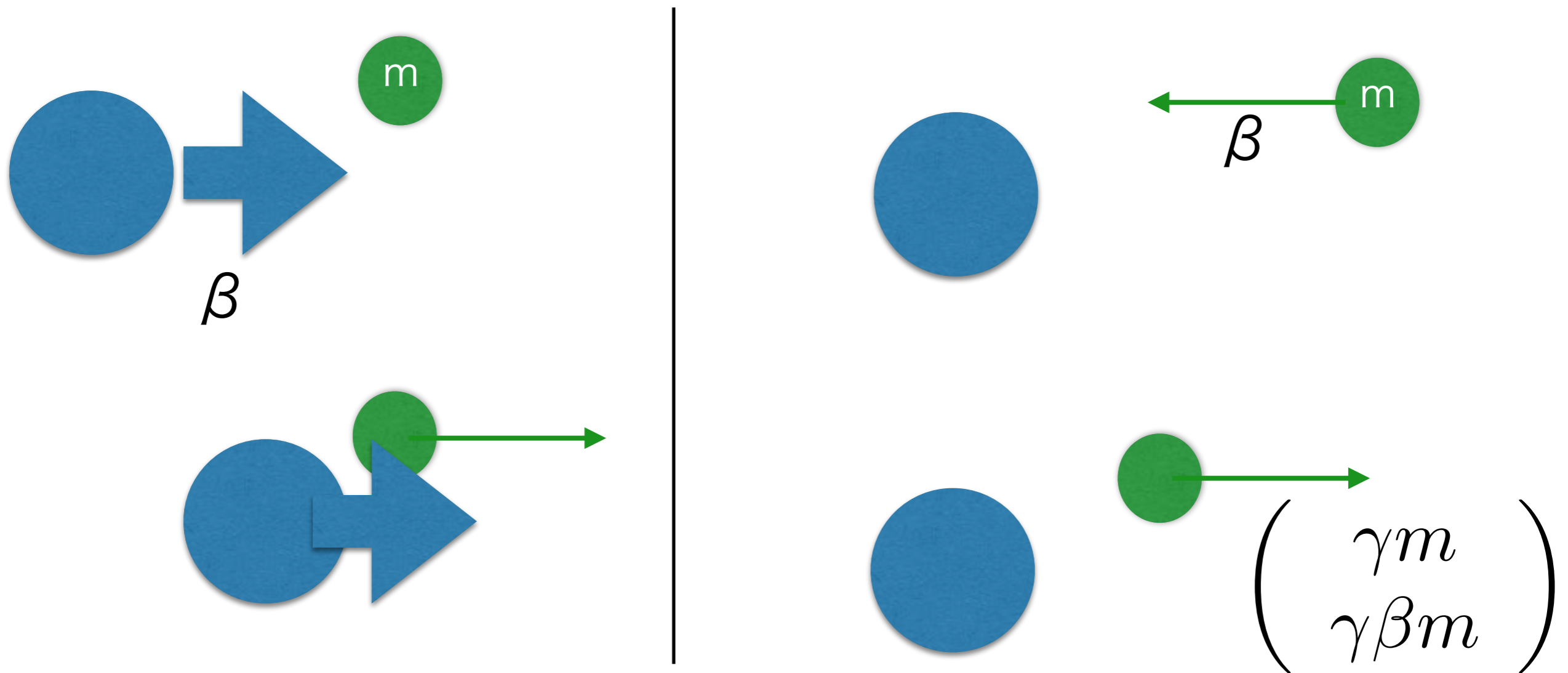


現実には、発散する前に
動いて逃げる
 \rightarrow 適用限界

$$D \sim \frac{\Delta p}{2m} \times \Delta T = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \frac{z}{\beta^2\gamma} \equiv b_{min} < b$$

古典電子半径 $r_e \equiv \alpha \frac{\hbar c}{mc^2} \sim 3\text{fm}$

注釈: 運動学で許される最大エネルギー損失からも同じ b_{min} を導ける

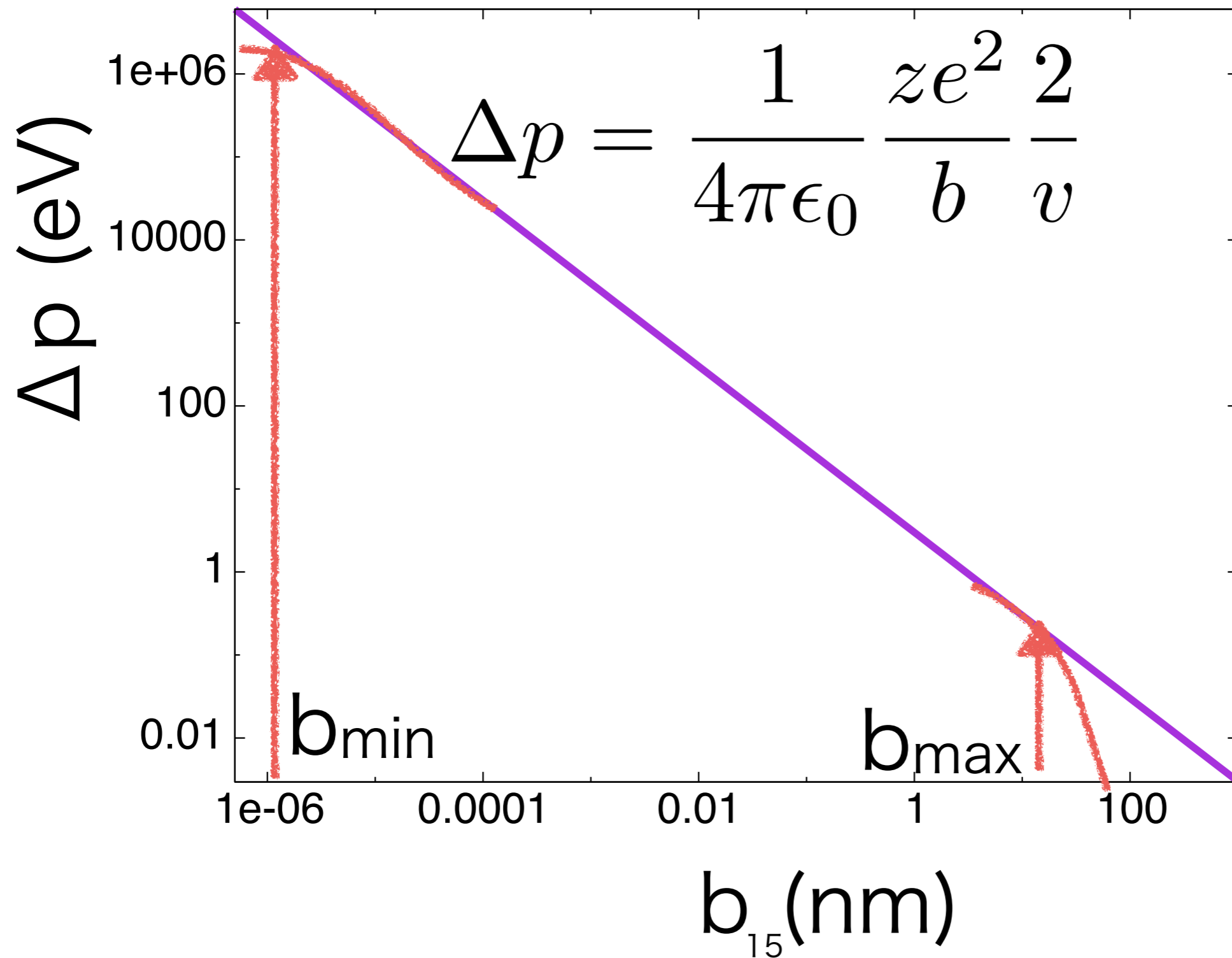


$$\begin{pmatrix} \gamma & \gamma\beta \\ \gamma\beta & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma m \\ \gamma\beta m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\gamma^2 + \gamma^2\beta^2)m \\ * \end{pmatrix}$$

$$K_{max} = (\gamma^2 + \gamma^2\beta^2 - 1)m = 2\gamma^2\beta^2 m \leftrightarrow \frac{\Delta p^2}{2m}$$

運動量キック

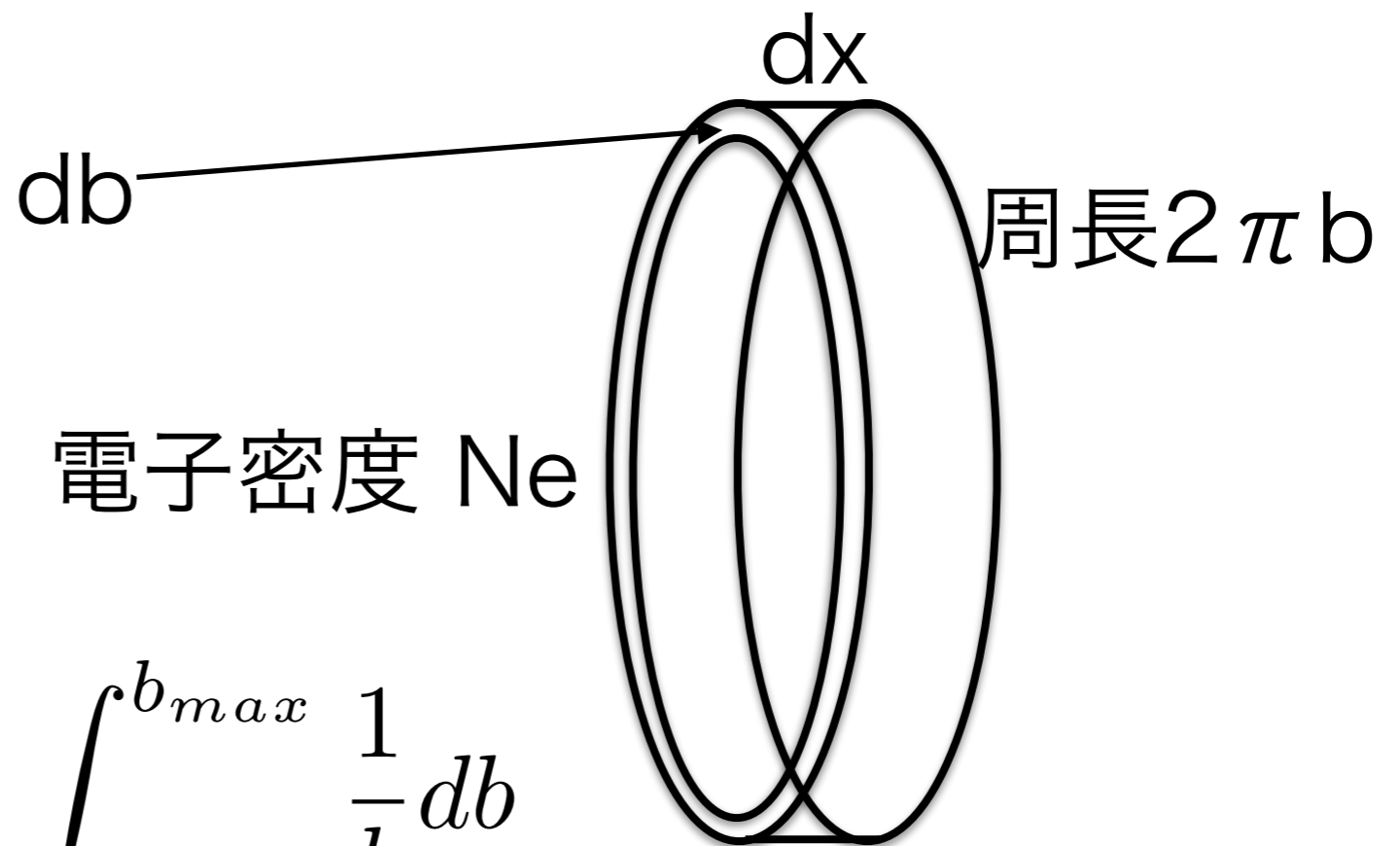
- $z=1, \beta \sim 1, \gamma \sim 3$



エネルギー移行

$$\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{2mc^2}{\beta^2} r_e^2 \frac{1}{b^2}$$

$$dE = \int_{b_{min}}^{b_{max}} \Delta E(b) N_e 2\pi b db dx$$



$$= 4\pi r_e^2 dx N_e \frac{mc^2}{\beta^2} \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{1}{b} db$$

- そのまま計算すると ($\gamma \sim 4$, $I=60\text{eV}$)

$$dE = 4\pi r_e^2 dx N_e \times \frac{mc^2}{\beta^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} \quad b_{max} = \frac{\pi \hbar c \beta \gamma}{I}$$

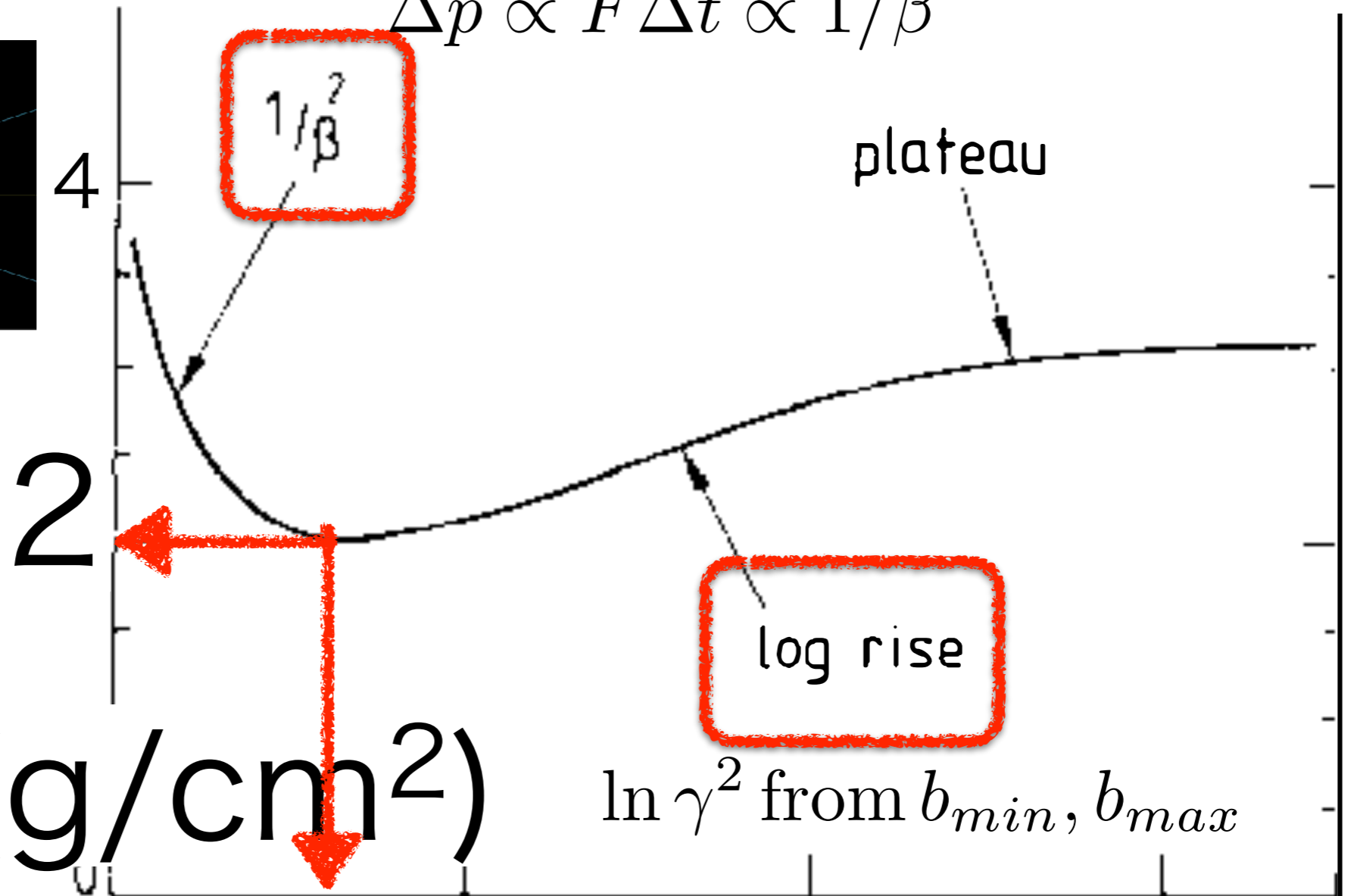
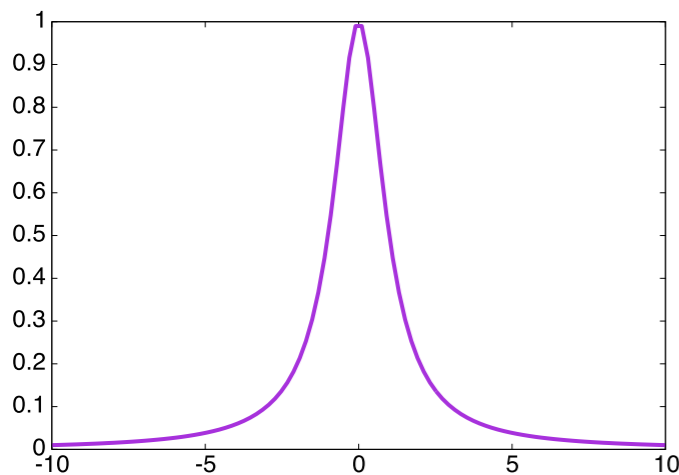
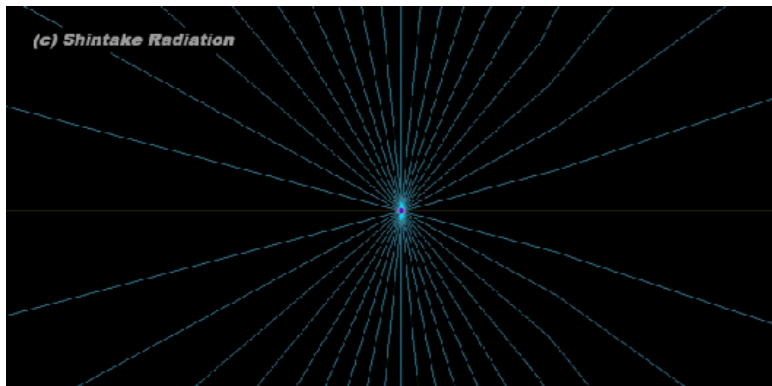
$$dE = 4\pi r_e^2 dx N_e \times \frac{mc^2}{\beta^2} \ln \frac{\pi \hbar c \beta^3 \gamma^2}{I r_e z} \quad b_{min} = \frac{r_e z}{\beta^2 \gamma}$$

$$\begin{aligned} dE/dX &= \frac{dE}{\rho dx} = 4\pi r_e^2 \frac{N_e}{\rho} \times \frac{mc^2}{\beta^2} \ln \frac{\pi \hbar c \beta^3 \gamma^2}{I r_e z} \\ &= 4\pi r_e^2 N_A \frac{Z}{A} \times \frac{mc^2}{\beta^2} \ln \frac{\pi \hbar c \beta^3 \gamma^2}{I r_e z} \\ &\quad \sim 4 \\ &\sim 3\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2) \end{aligned}$$

dE/dX : 平均的拳動

$$\Delta T = \frac{2b}{\gamma v}$$

$$\Delta p \propto F \Delta t \propto 1/\beta$$



$$2 \text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$$

$$\beta \gamma \sim 4$$

dE/dXのご利益

- 日夜降り注いでいる宇宙線による被曝、計算できる。
- 検出器の挙動の基礎
- 運動量測定+dE/dX -> 粒子識別にも使える。

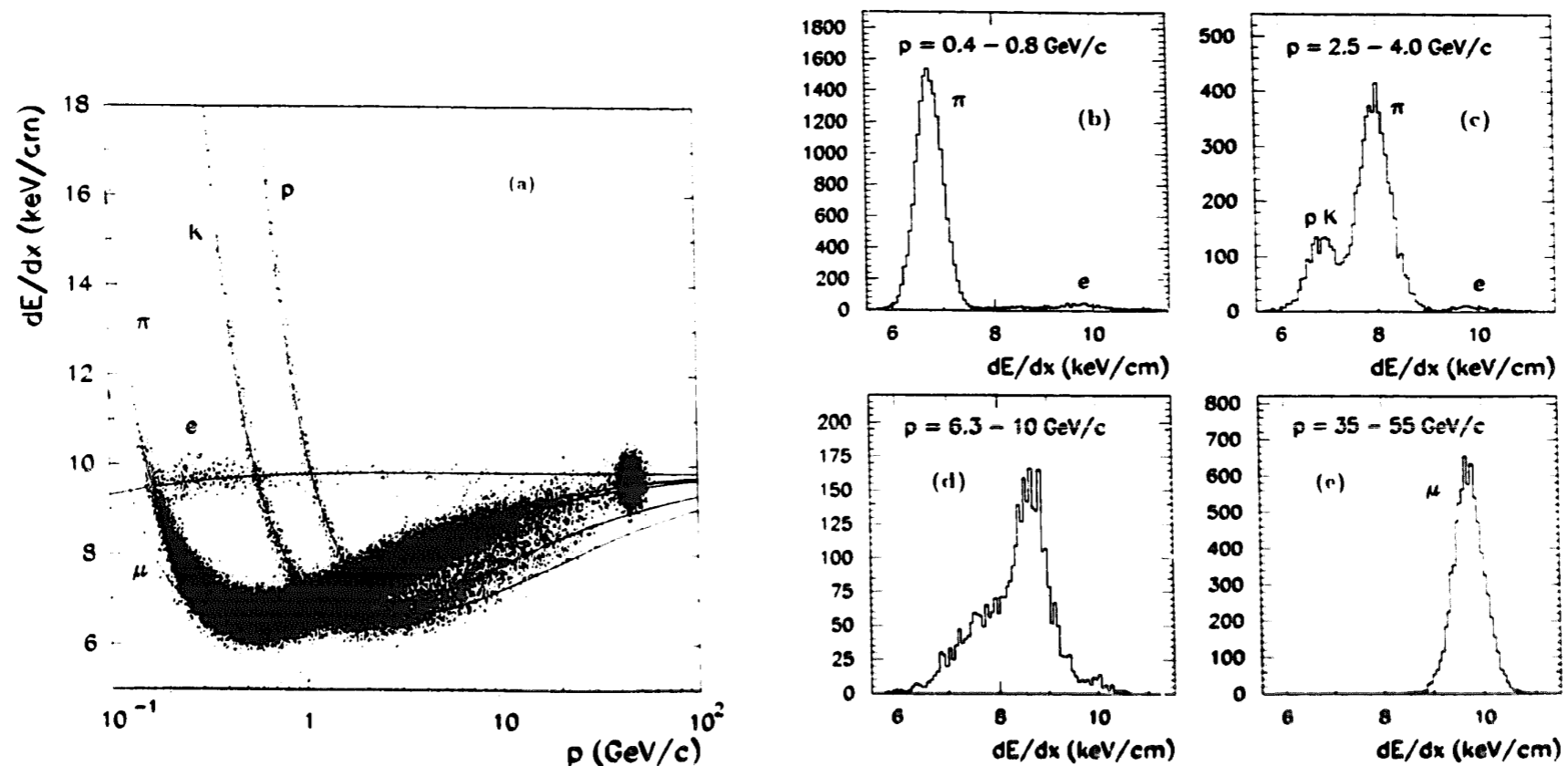
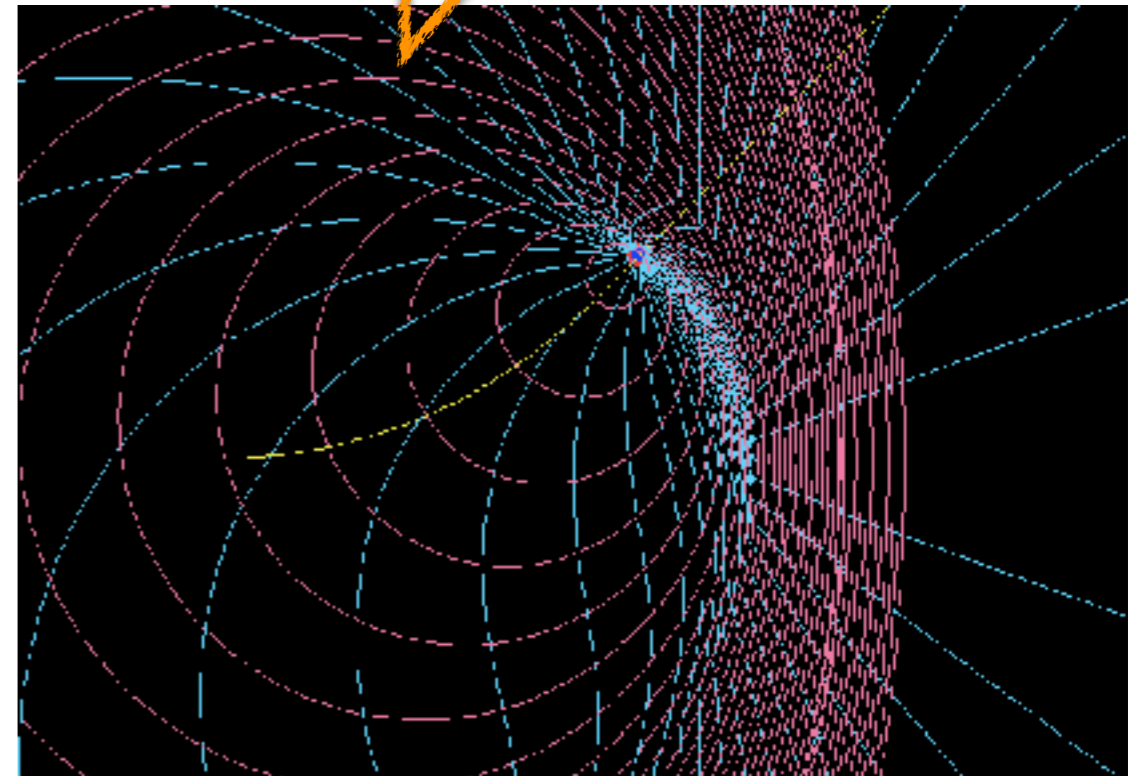
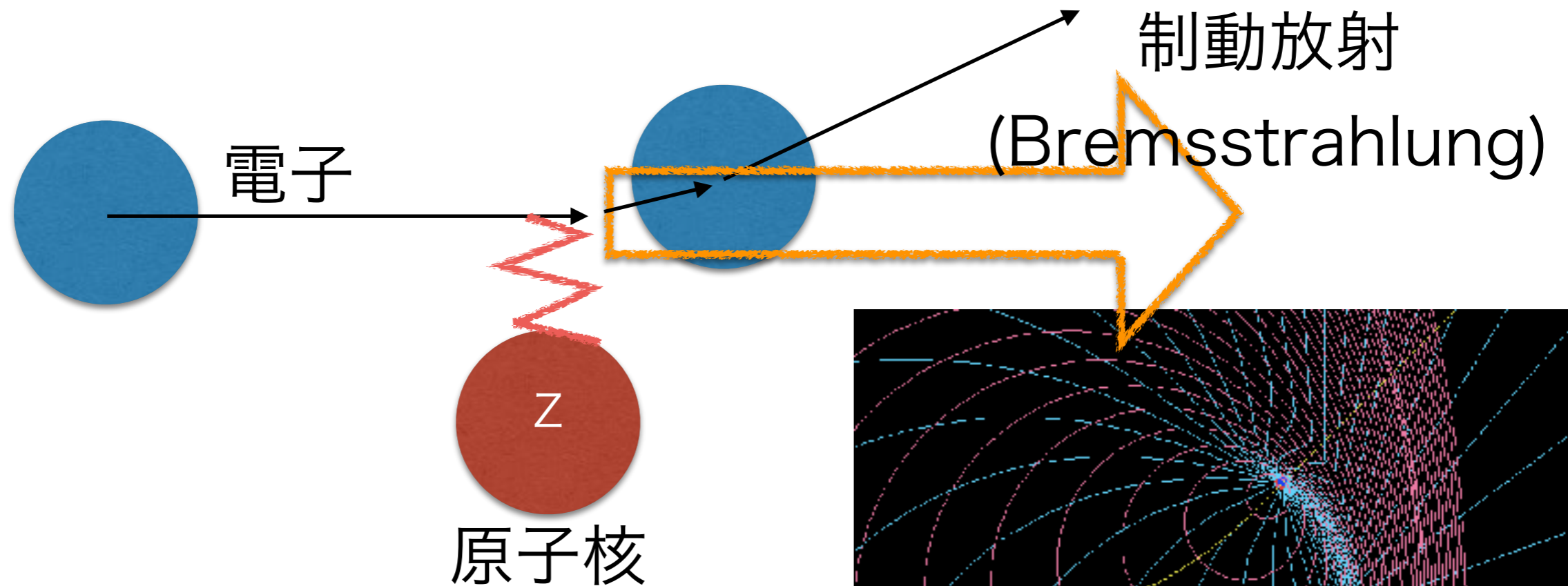


Fig. 9. Truncated mean (a) for tracks in multihadronic events and dimuon events as a function of the particle momentum, (b)-(d) for tracks in multihadronic events in the momentum ranges 0.4-0.8, 2.5-4.0, and 6.3-10 GeV/c, respectively, and (e) for muons with momentum of 35-55 GeV/c.

電子を入射すると？

- 原子核が強くキック-> 電場が引き剥がされる-> 放射



制動放射も起こす

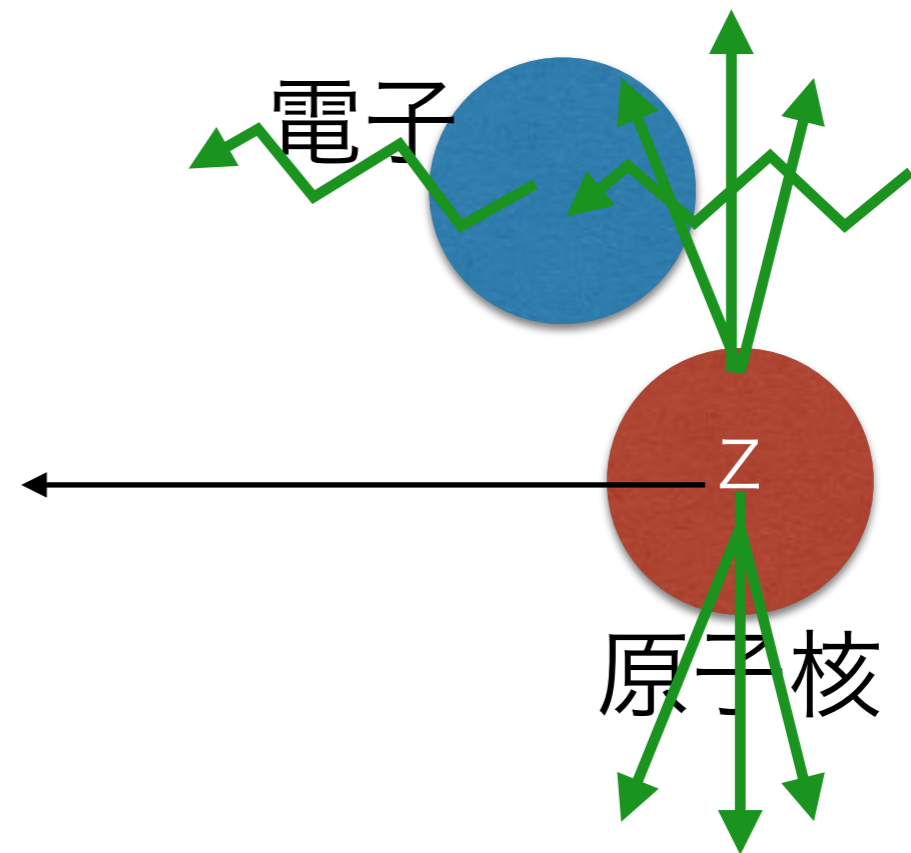
- 単位長さの放射エネルギーは、自分のエネルギーに比例する。
- 最大自分のエネルギーをすべて放射

$$-\frac{dE}{dX} = \frac{E}{X_0}$$

$$E(X) = E_0 \exp\left(-\frac{X}{X_0}\right)$$

X_0 : Radiation length :

電子のエネルギーが放射で $1/e$



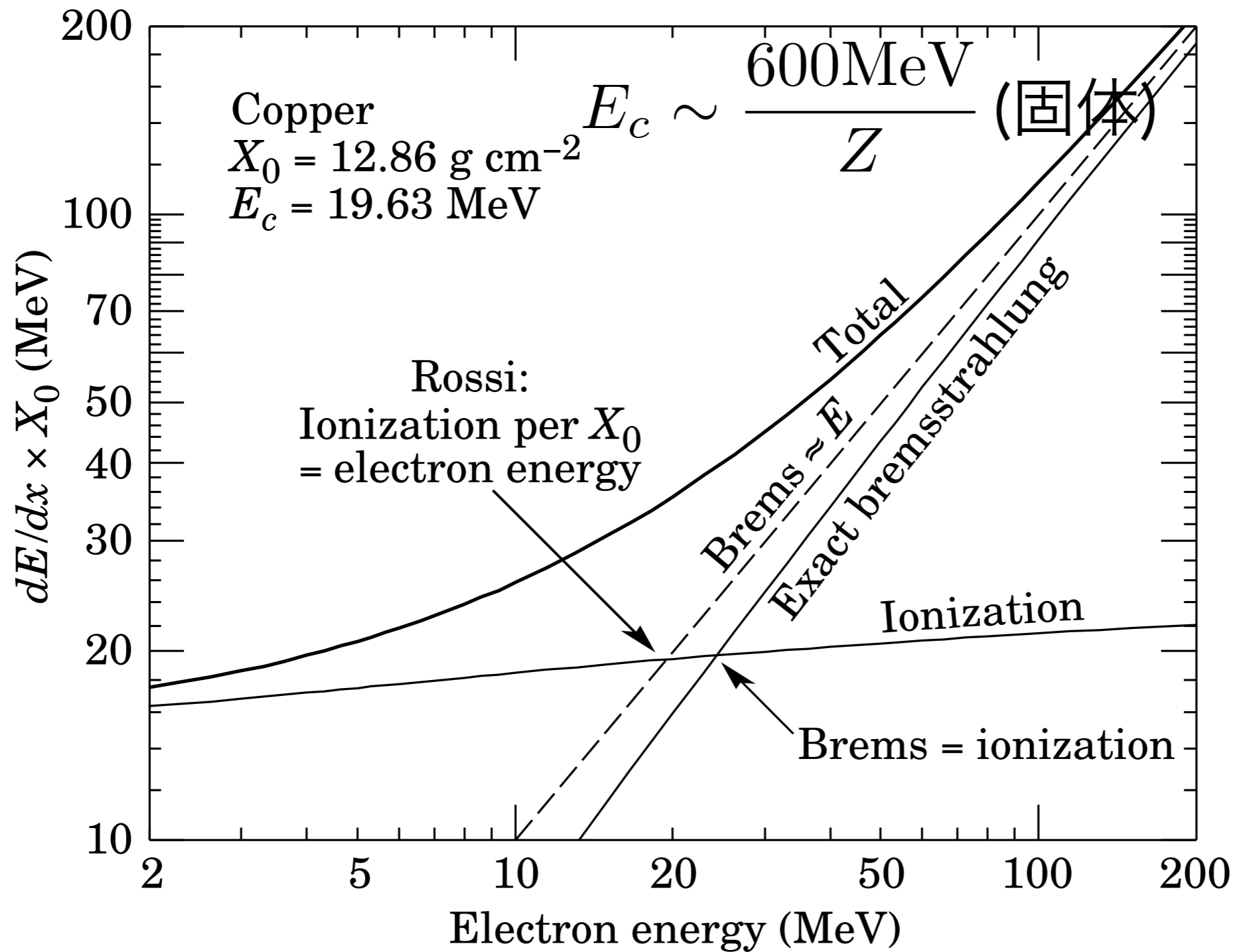


Figure 33.13: Two definitions of the critical energy E_c .

Radiation length

$$1/X_0 = 4\alpha r_e^2 \frac{Z^2}{A} N_A \quad (\text{cm}^2/\text{g})$$

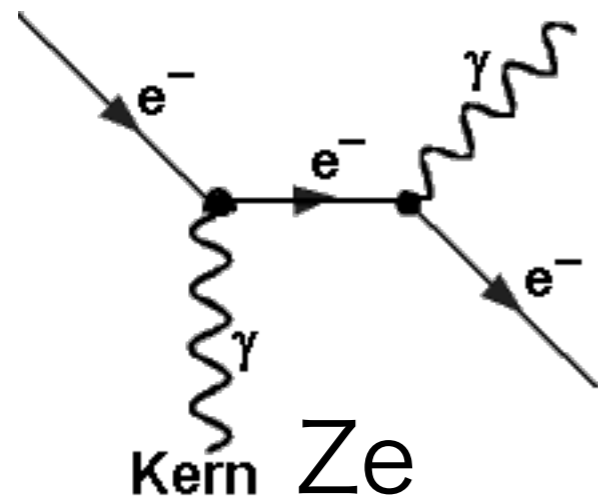
断面積: $1/X_0$

面積次元: r_e^2

α : 3乗

核電荷: Z^2

核密度: $\rho/A \times N_A$



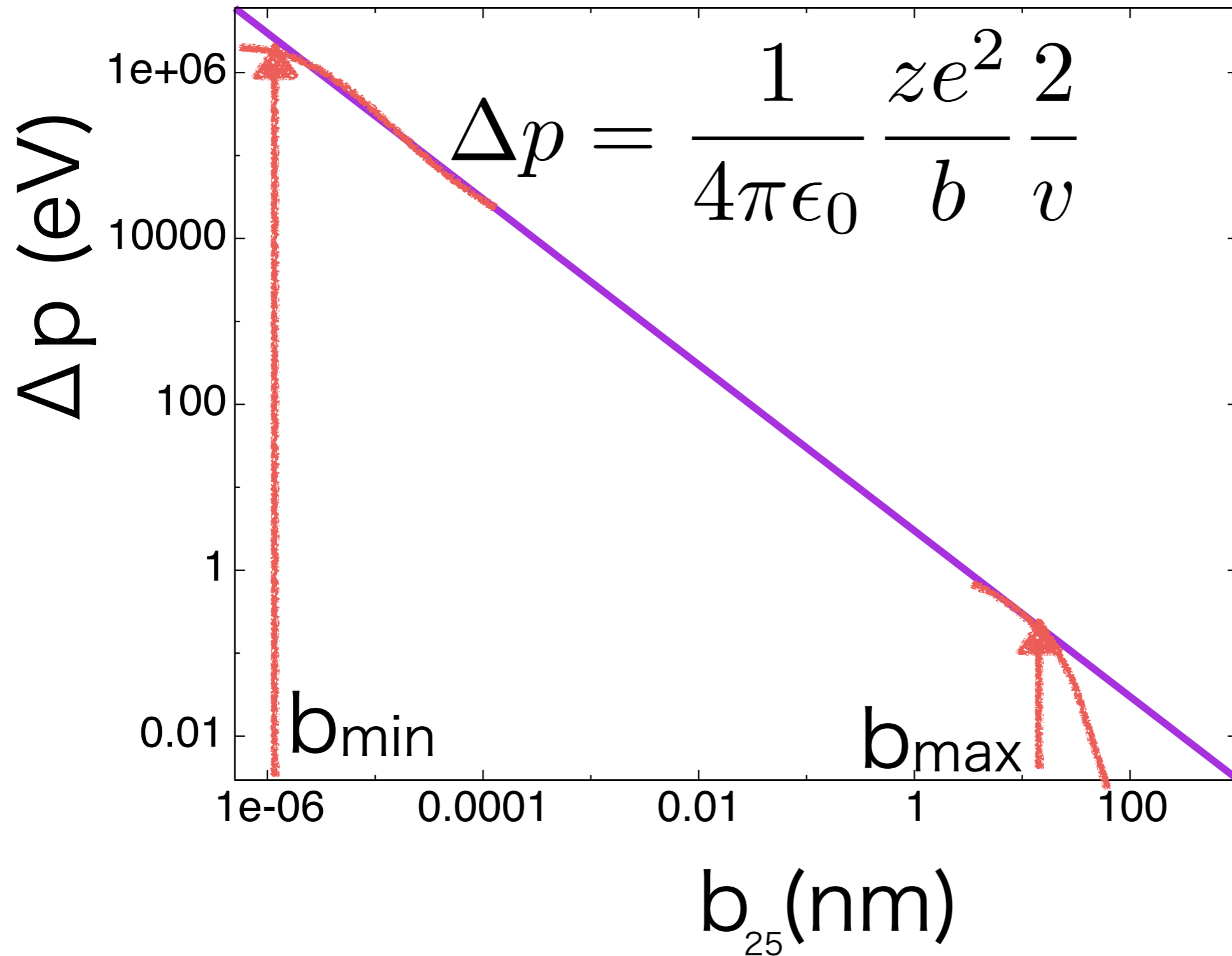
	X_0 (cm)	E_c (MeV)	λ_I (cm)
プラスチック	43	94	79
CsI	1.86	11	38
Fe	1.8	21	16.8
Pb	0.56	7.4	17.6

Fluctuation

- dE/dX は平均
- Event by eventでのfluctuationはどうだろうか？
 - エネルギー損失
 - 通過位置

運動量キック

- $z=1, \beta \sim 1, \gamma \sim 3$

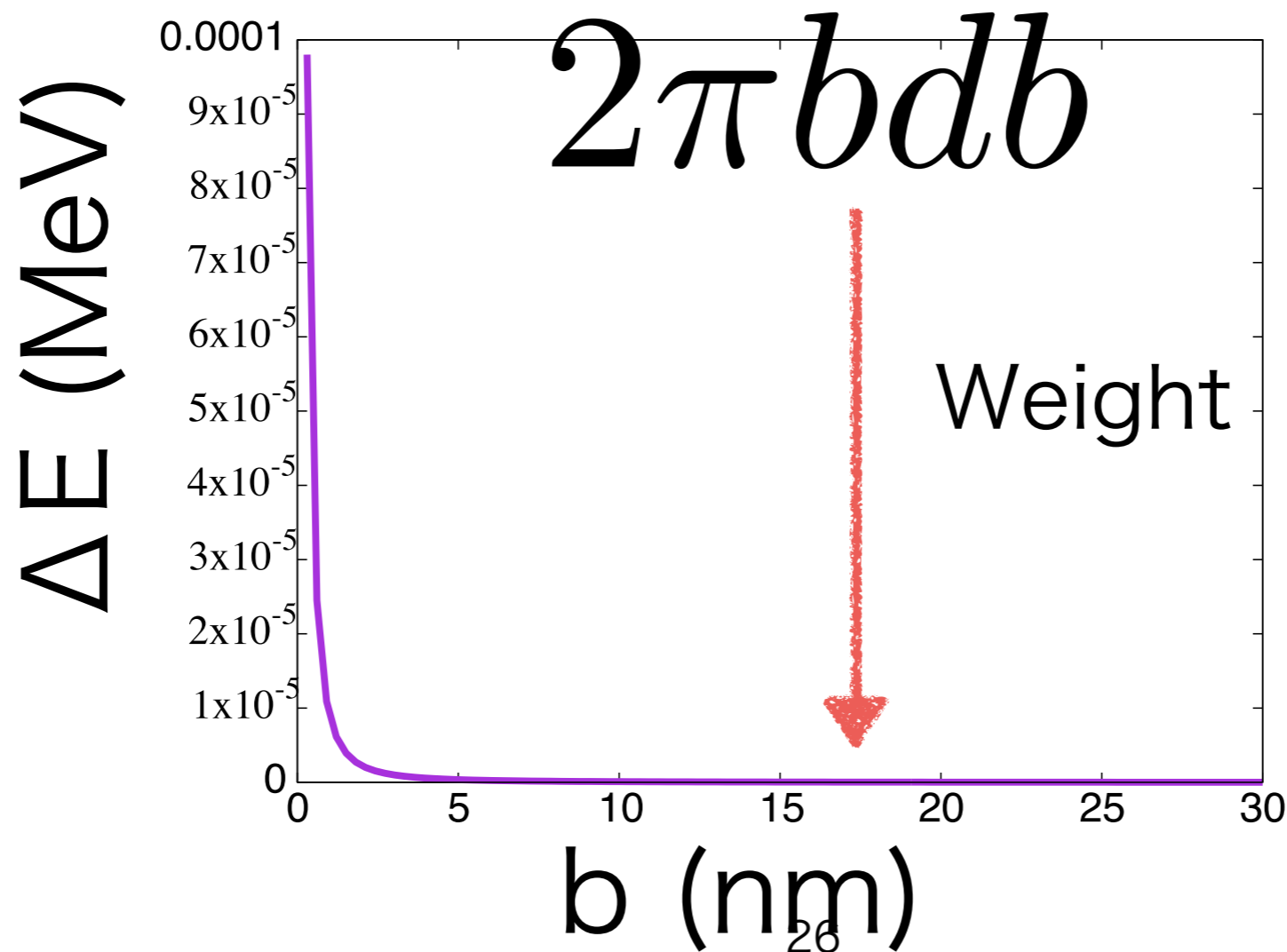


エネルギー損失

- 個々の電子の受けるエネルギー

$$\Delta p(b) = 3(\text{eV})/b(\text{nm})$$

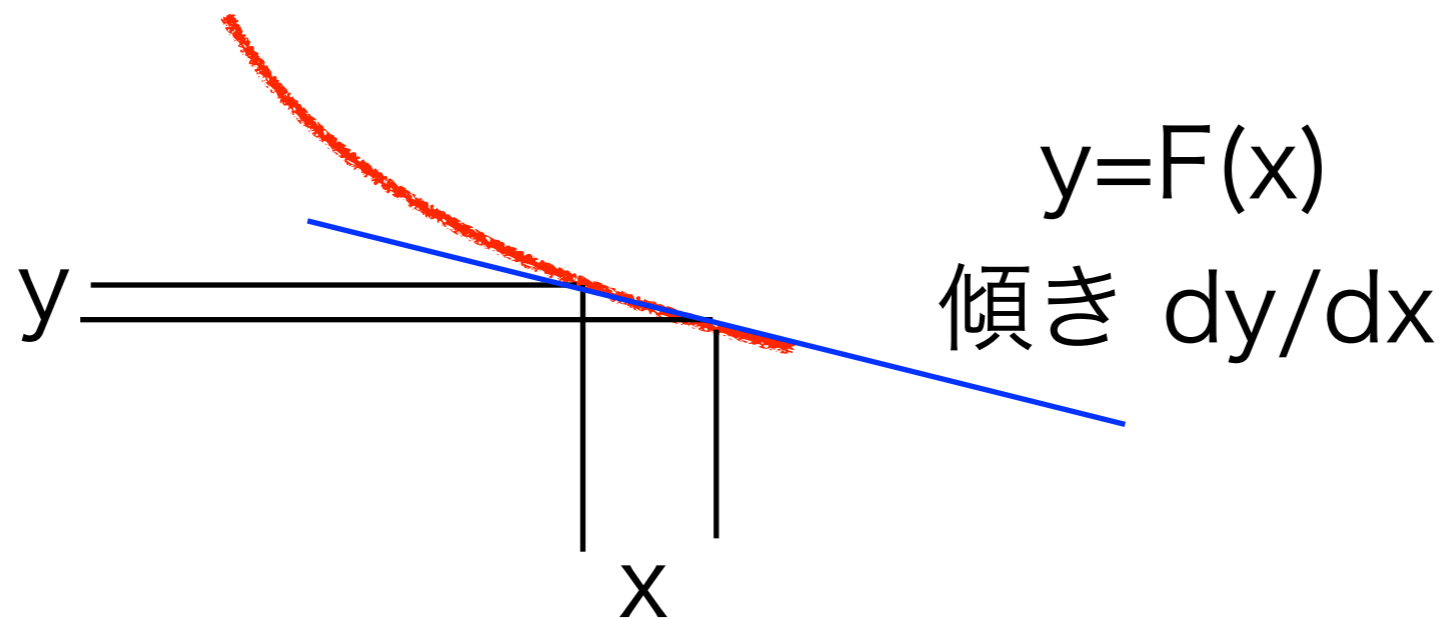
$$\Delta E(b) = \frac{10^{-5}(\text{MeV nm}^2)}{b^2}$$



確率分布は？

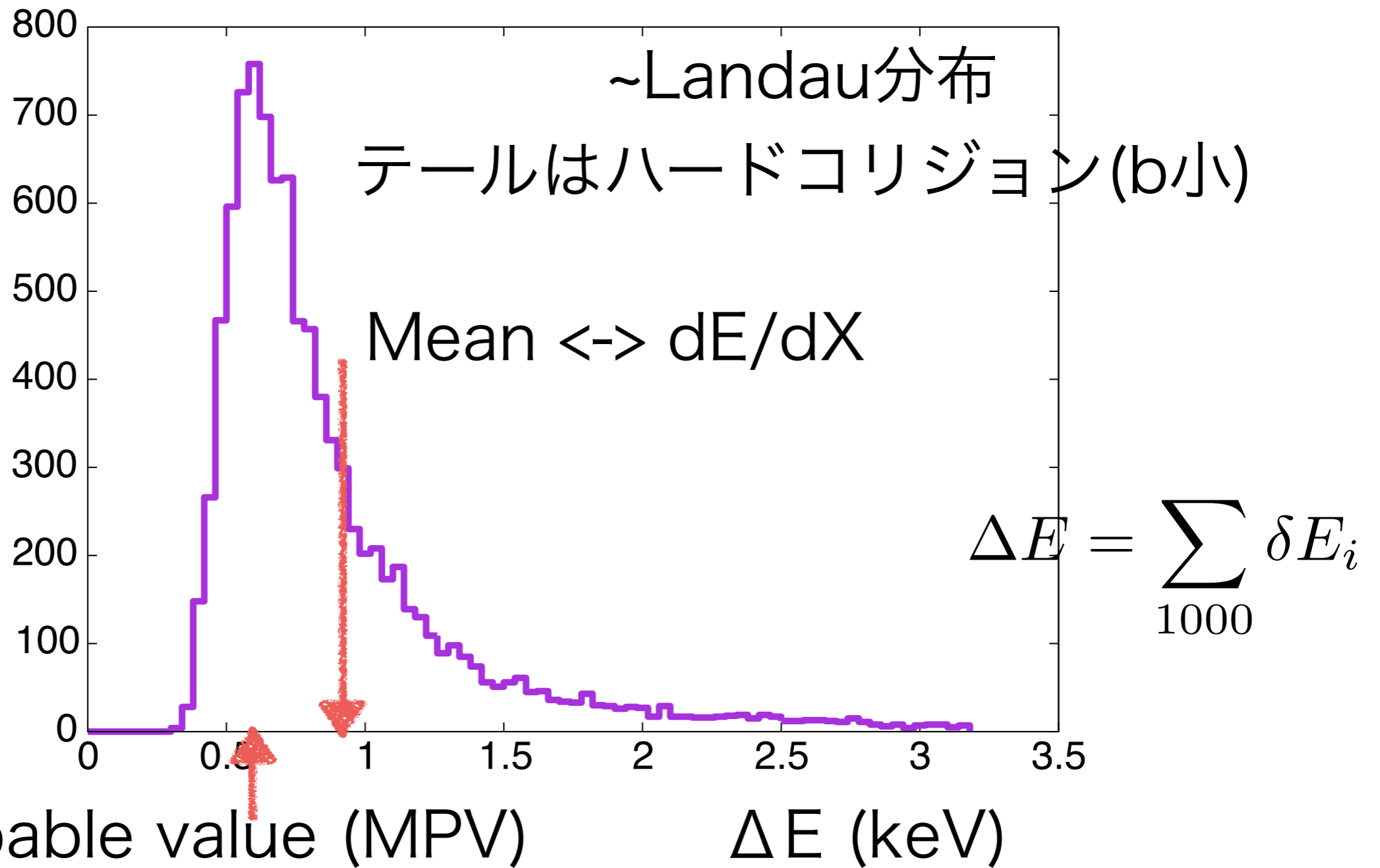
• b の確率 $\propto b$ $\Delta E(b) = \frac{10^{-5} (\text{MeV nm}^2)}{b^2}$

• ΔE の確率 $\propto | 1 / (dF(b)/db) |$



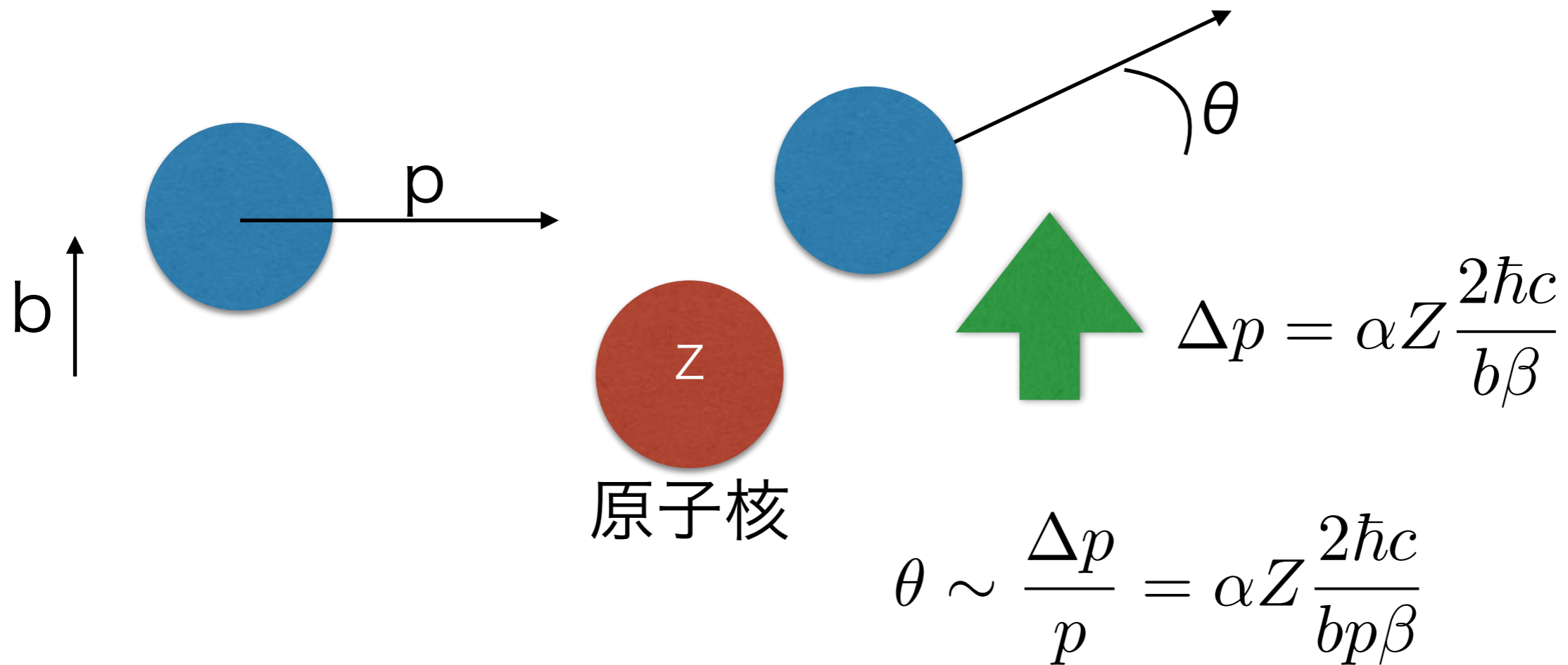
$$P(\Delta E) \propto b^3 \times b = b^4 \propto \frac{1}{\Delta E^2}$$

- たとえば、常に1000 電子が関与/event



原子核もいるよね？

- エネルギー損失： $\propto 1/M \rightarrow$ 効かない
- そのかわり、入射粒子がキックされる。(弾性散乱)



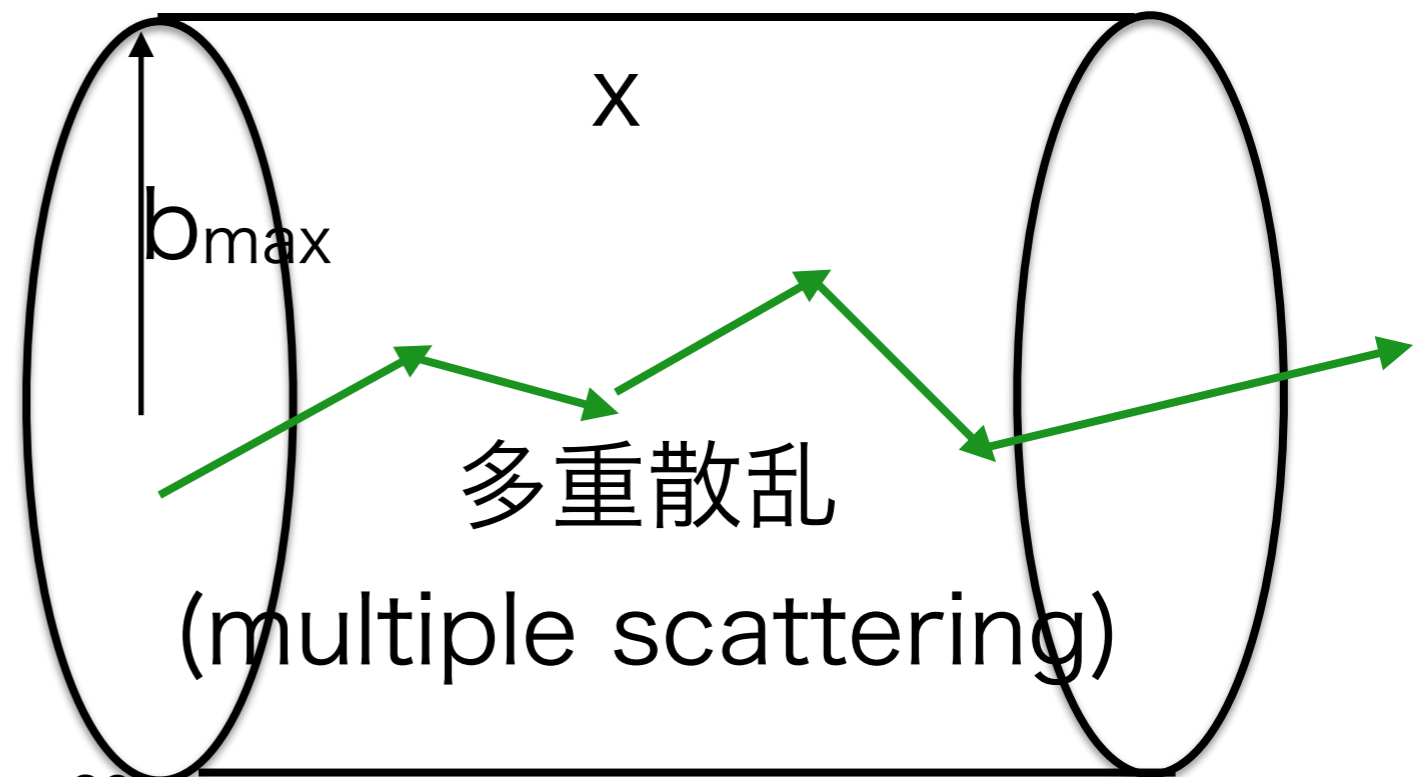
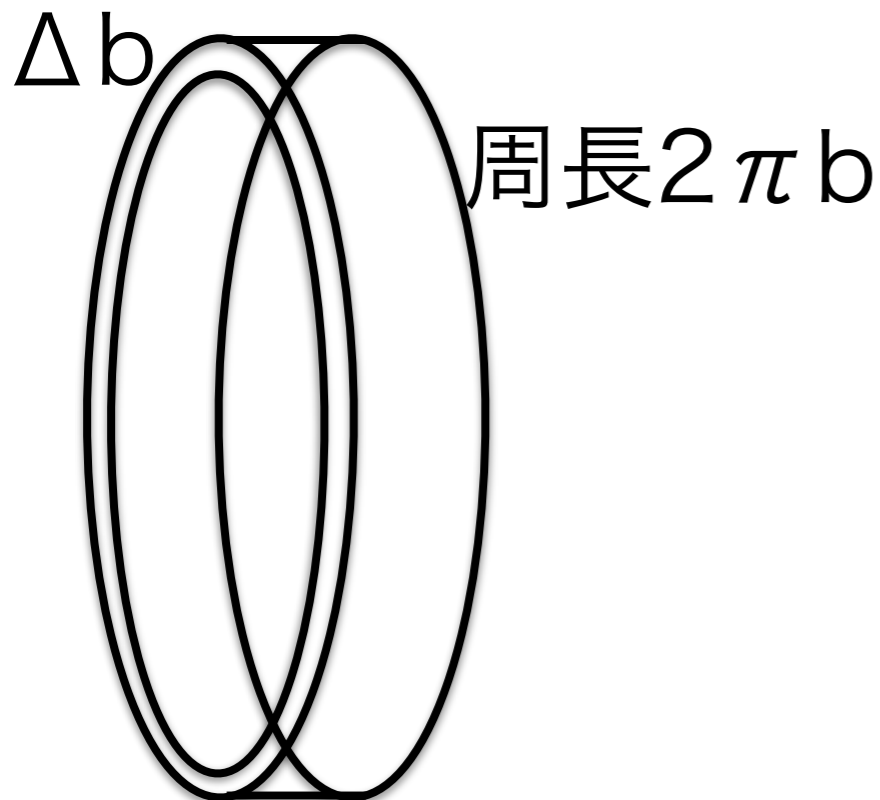
どのくらい広がる？

$$\theta \sim \frac{\Delta p}{p} = \alpha Z \frac{2\hbar c}{bp\beta}$$

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{\int \theta(b)^2 2\pi b db}{\int 2\pi b db} \times N_{collision}$$

X(質量長さ)

$$N_{collision} = \pi b_{max}^2 \times x \times \frac{\rho}{A} N_A$$



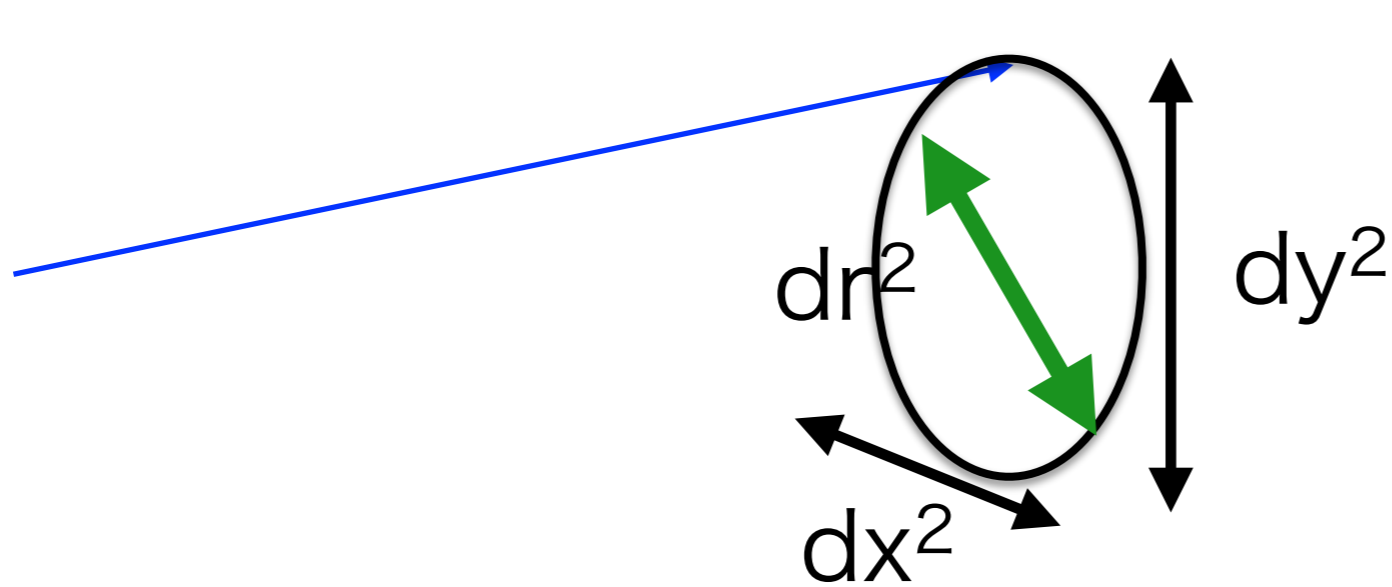
$$\langle \theta^2 \rangle = \left(\alpha Z \frac{2\hbar c}{p\beta} \right)^2 \times 2\pi [\ln b] \times \frac{1}{A} N_A X$$

$$1/X_0 \sim 4\alpha r_e^2 \frac{Z^2}{A} N_A$$

$$\theta_{RMS} = \frac{2\alpha\hbar c}{r_e} \frac{1}{p\beta} \times \sqrt{\frac{2\pi [\ln b]}{4\alpha}} \sqrt{\frac{X}{X_0}}$$

$$\frac{2 \cdot 200 \text{ MeV fm}}{137 \cdot 3 \text{ fm}} \sqrt{\frac{6 \cdot 4 \cdot 137}{4}}$$

28 MeV



$$d\theta^2 = d\theta_x^2 + d\theta_y^2$$

$$\theta_x^{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{RMS}$$

$$\theta_x^{RMS} \sim \frac{20(\text{MeV})}{p\beta} \times \sqrt{\frac{X}{X_0}} \quad \begin{array}{l} 20\text{GeV}/c \text{ proton} \\ 1X_0 \text{で、} 0.001\text{rad} \end{array}$$

だいたいPDGと同じ

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \left[1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right].$$

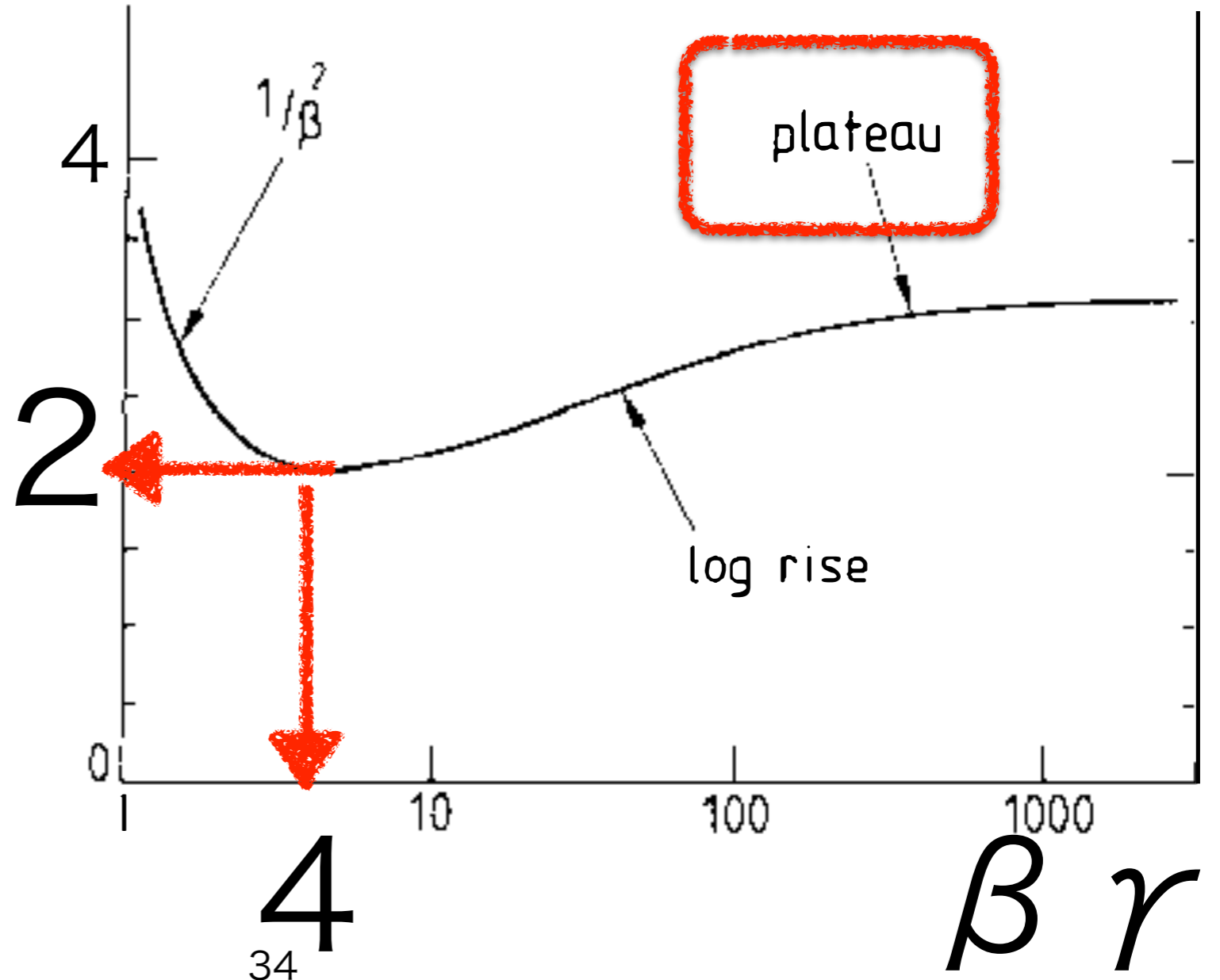
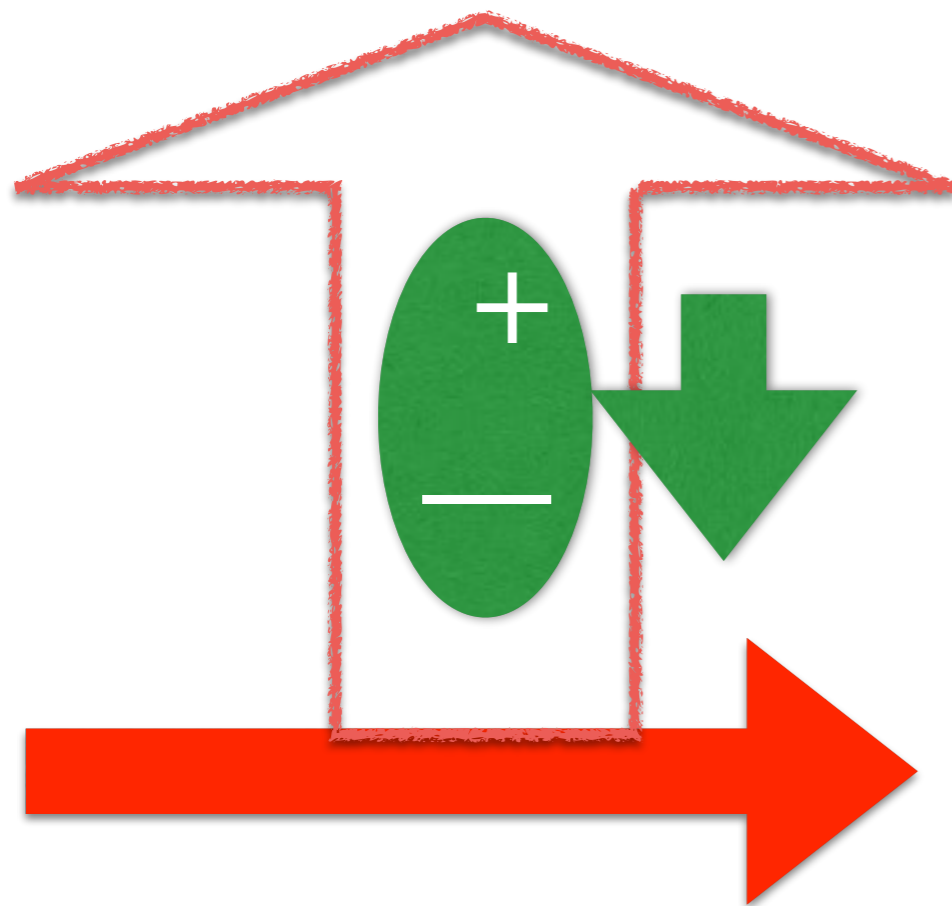
Multiple scattering

- 荷電粒子の飛跡に悪影響
 - 特に低運動量 \rightarrow 物質量軽減の戦い
- 荷電粒子トラックを選びだす
- 磁場での曲がり \rightarrow 運動量測定
- 検出器の位置分解能の評価

原子の分極：原子核と電子

- 媒質効果

- 分極して、荷電粒子の作る電場を遮蔽 (Density effect)

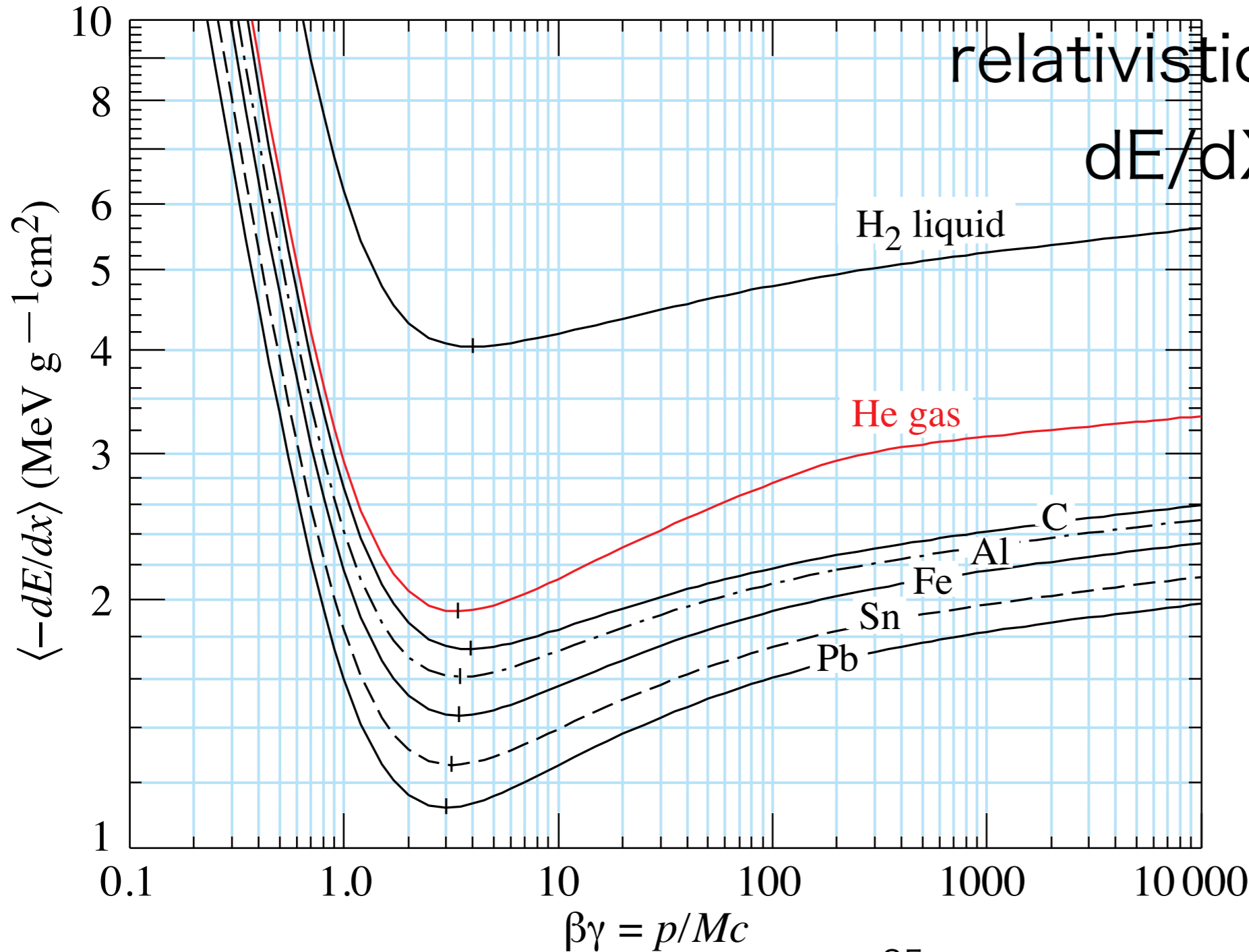


Density effect

ガスは媒質による飽和が緩い

relativistic rise +50-70%

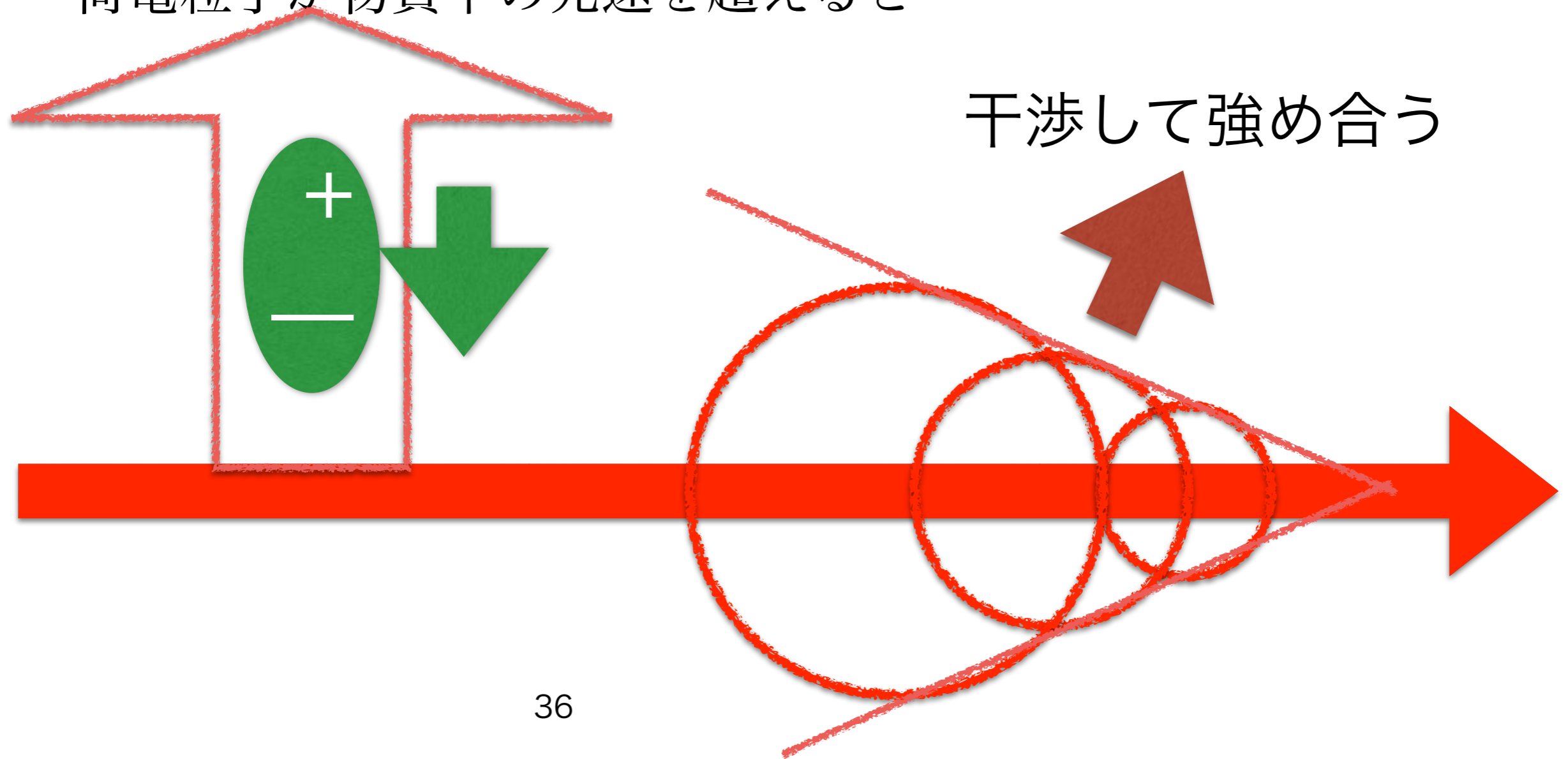
dE/dXからのPID



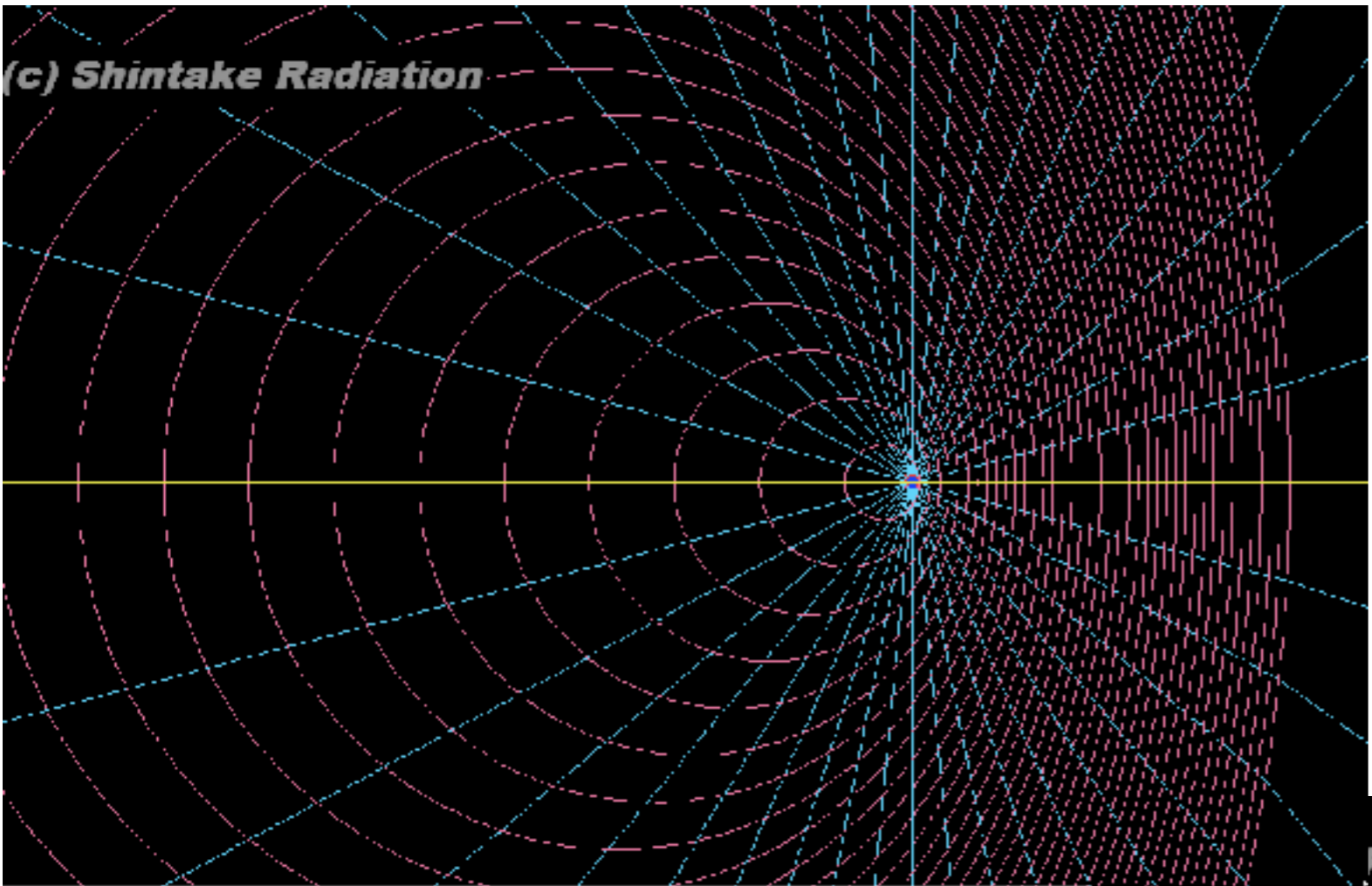
原子の分極：チェレンコフ放射

- 媒質効果

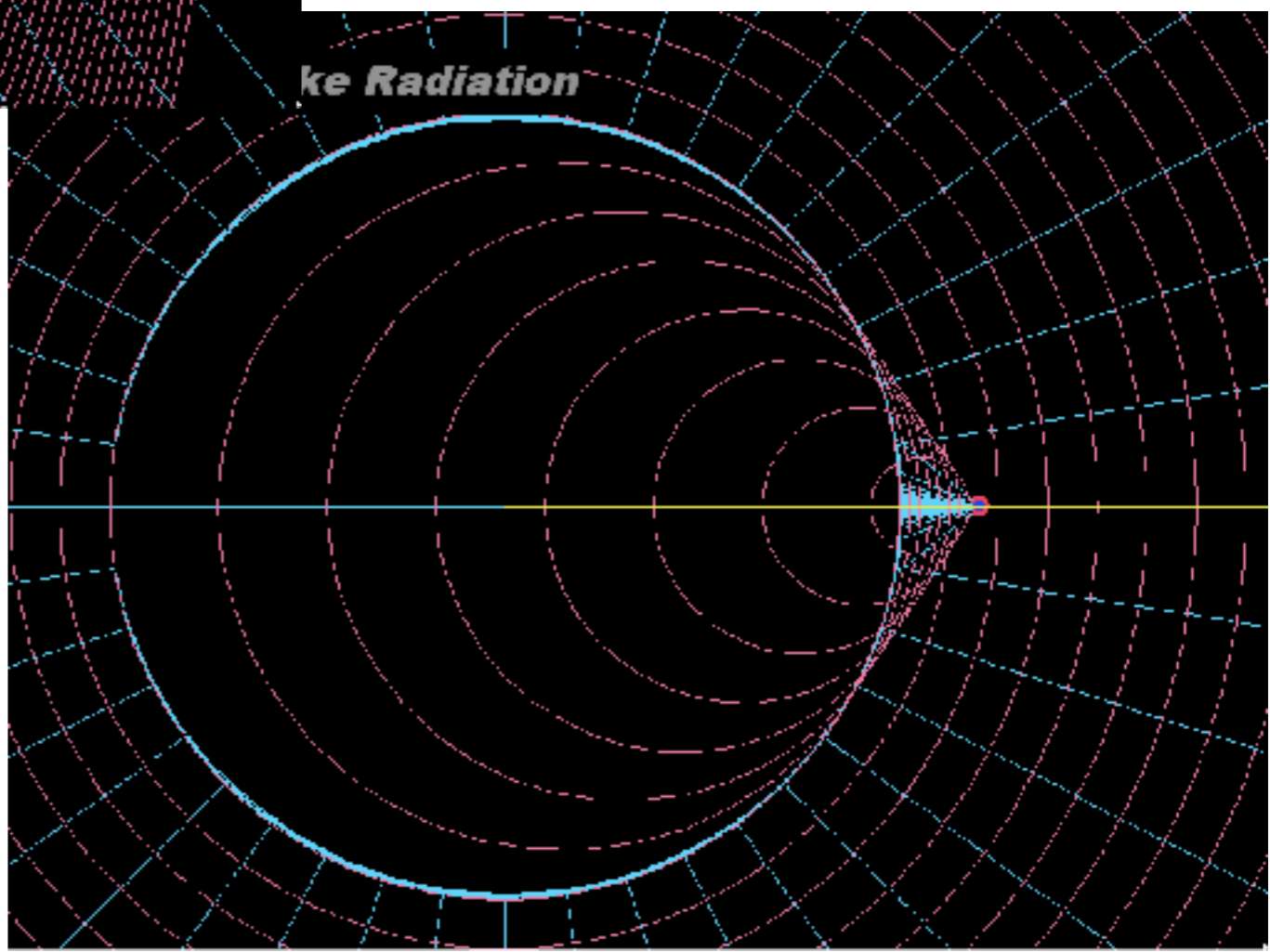
- 誘電率 \rightarrow 電場の変動を緩和 \rightarrow 物質中の光速に遅れ
- 荷電粒子が物質中の光速を超えると



(c) Shintake Radiation



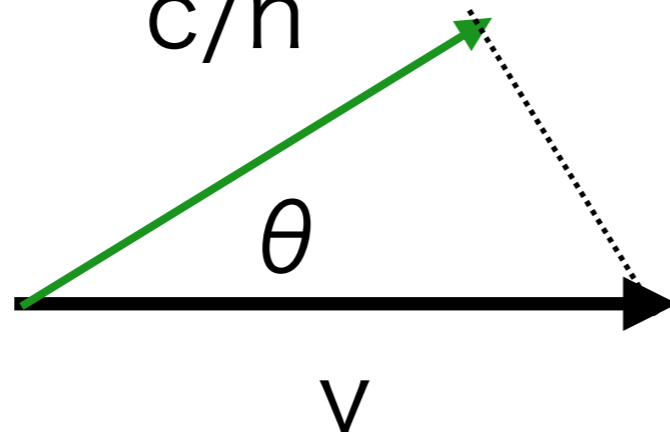
ke Radiation



Cherenkov radiation

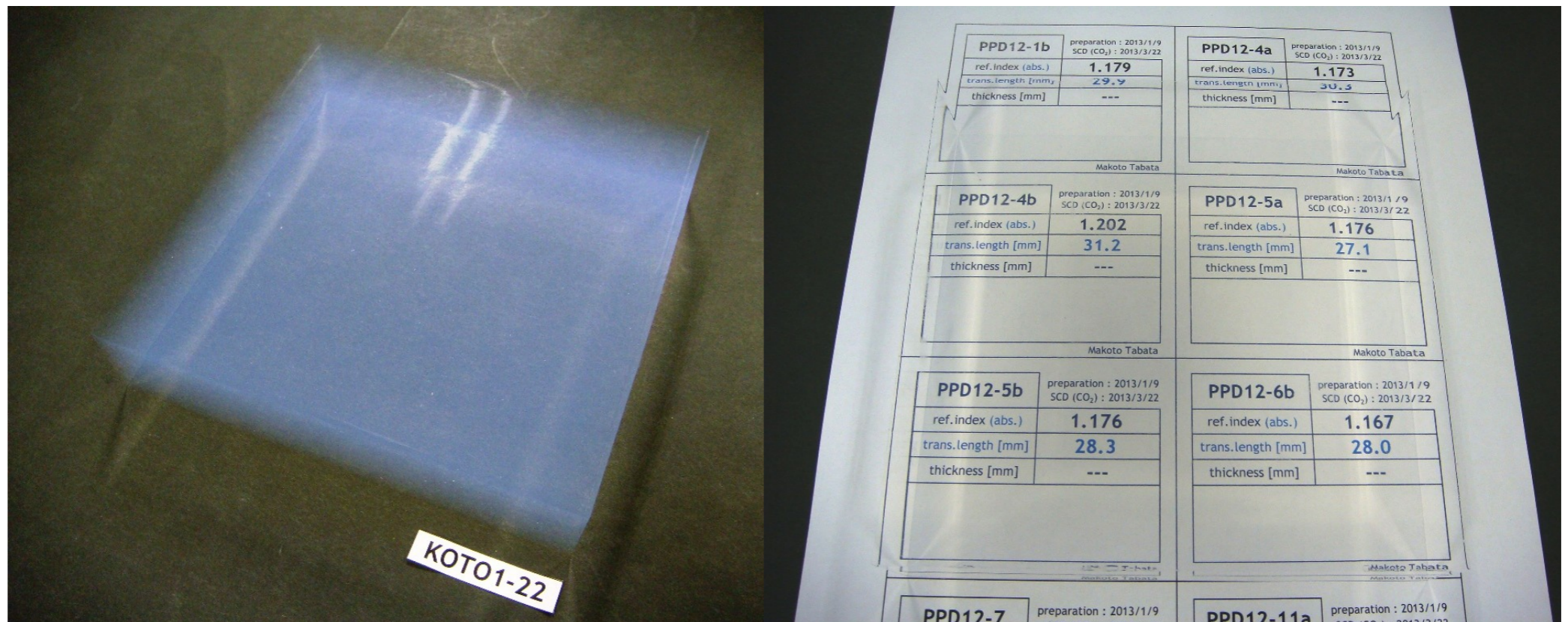
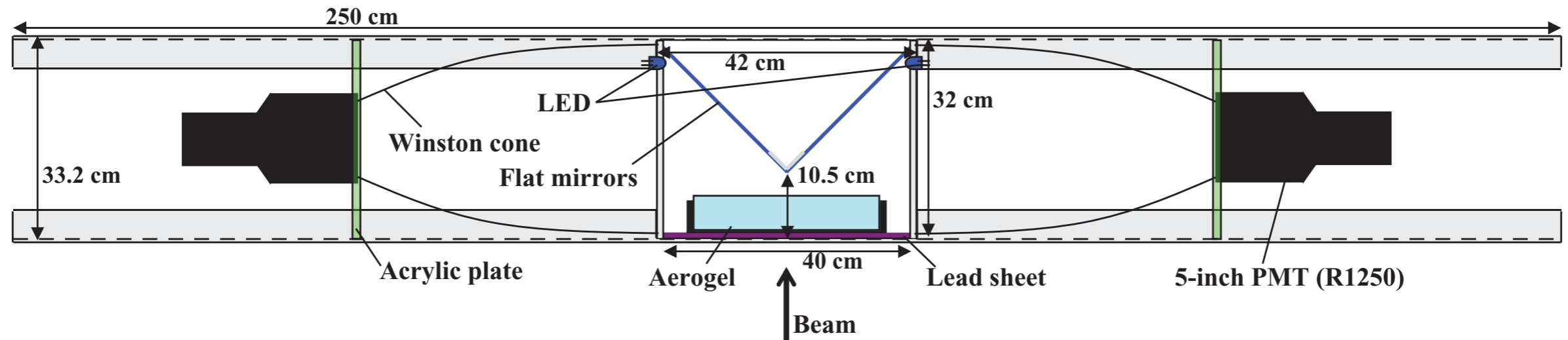
- 高速粒子を選択可能
- アクリル、石英、水、エアロゲル、ガスなどの媒質
 - 紫外よりの光をより出しやすい。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} < \frac{1}{c/n}$$



使用例

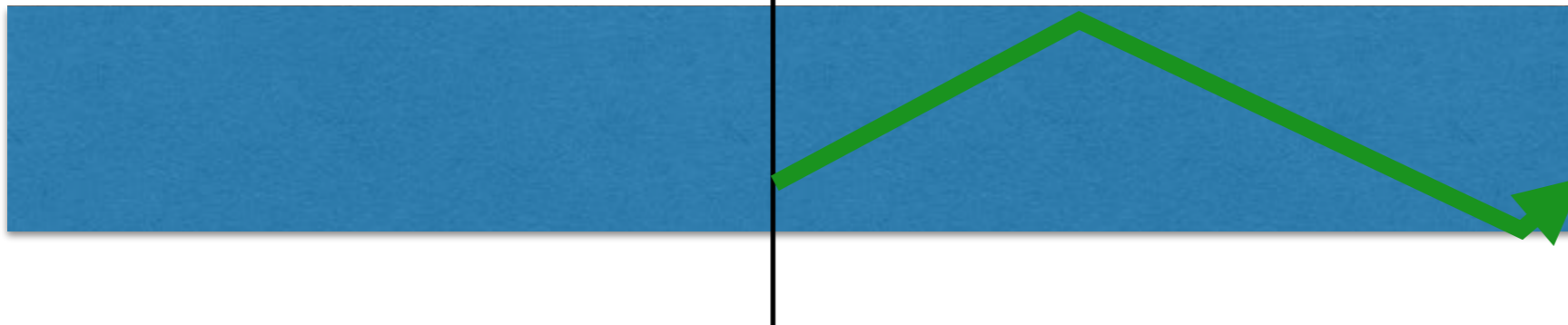
- 99.5% gamma efficiency, 1% neutron efficiency



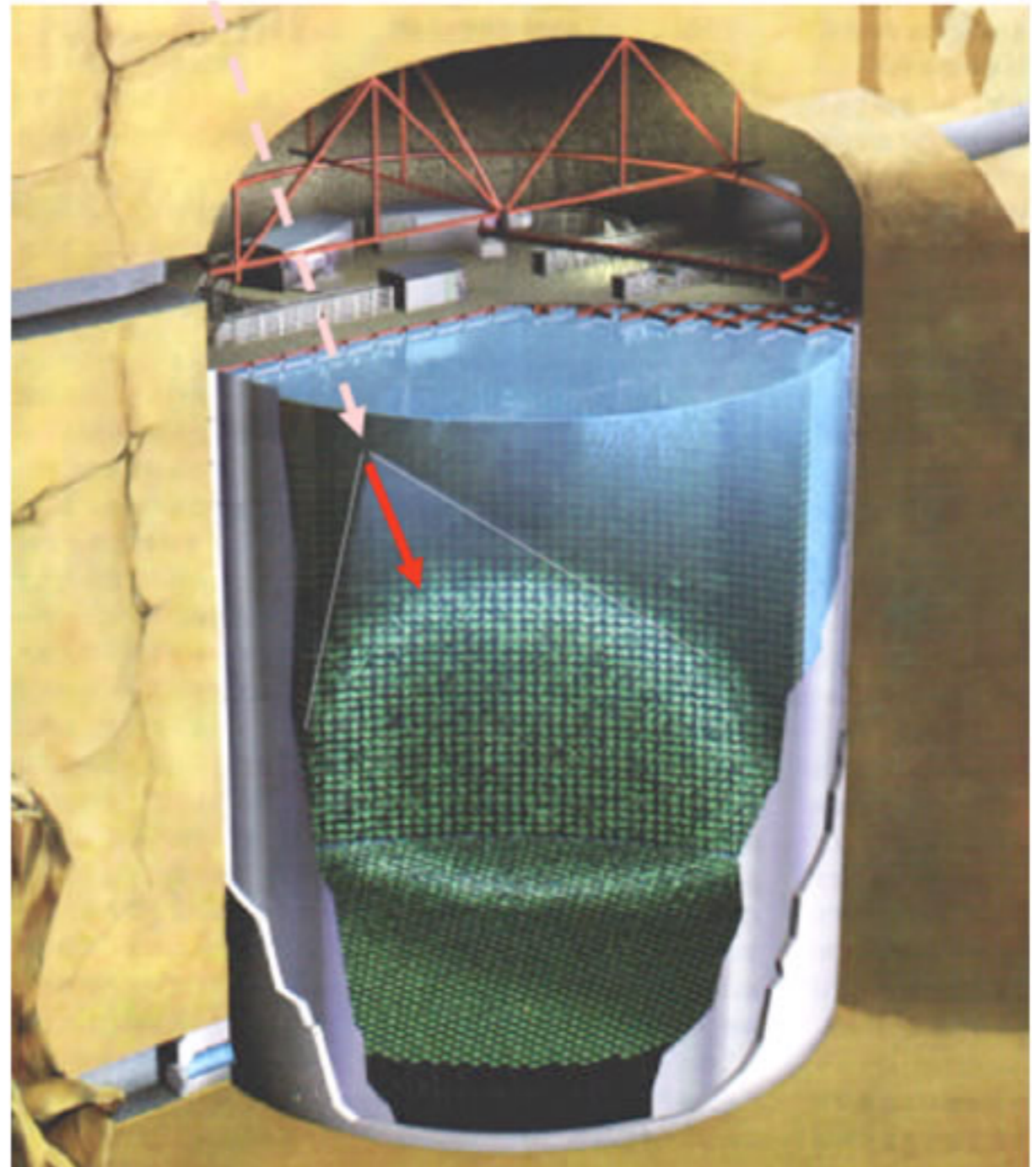
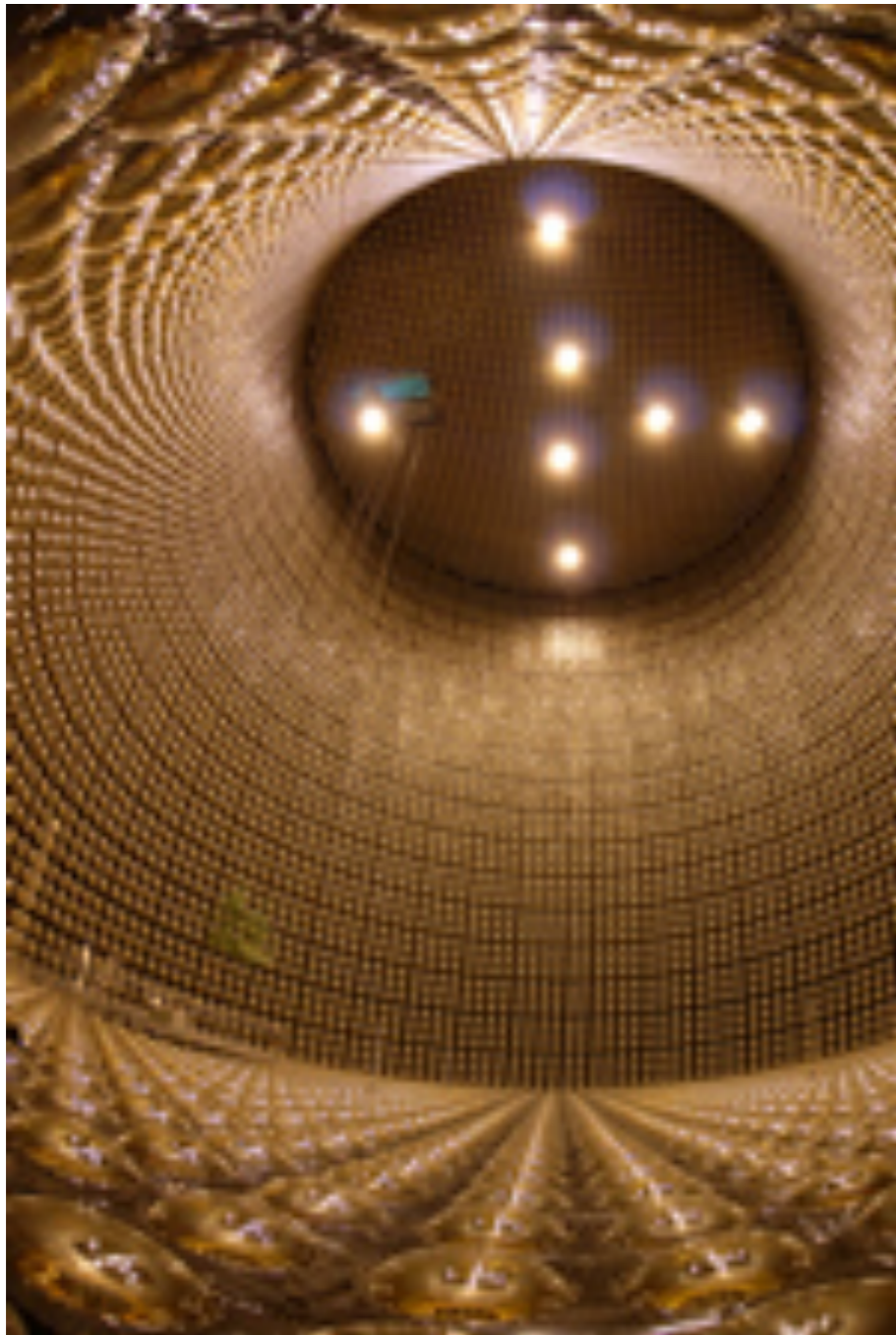
- アクリルチェレンコフ + 全反射



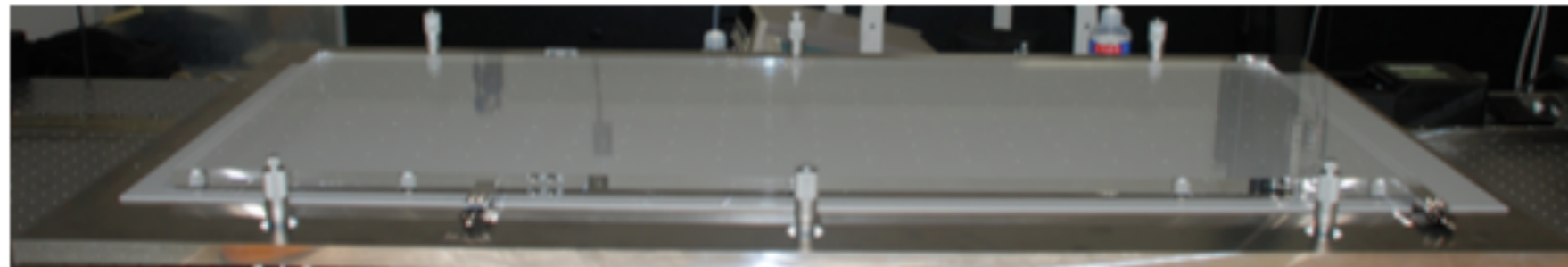
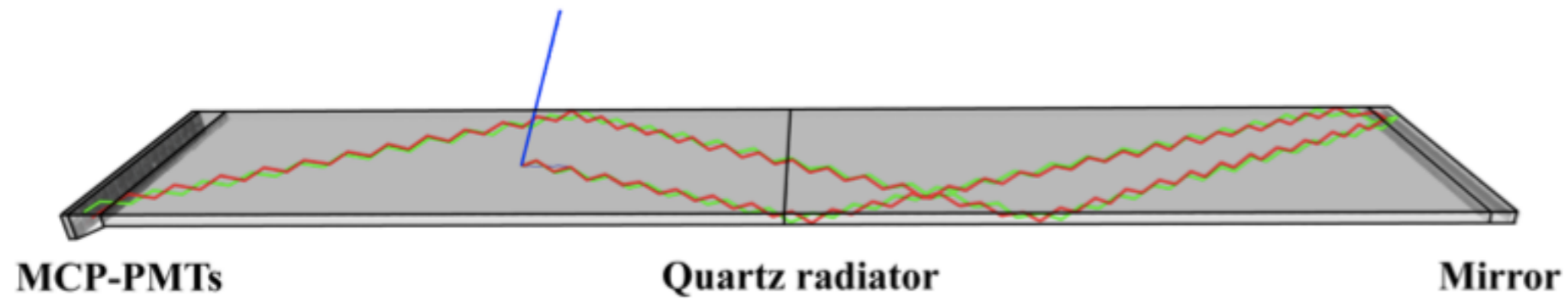
チェレンコフ角度大
-> アクリル内部を全反射で伝搬



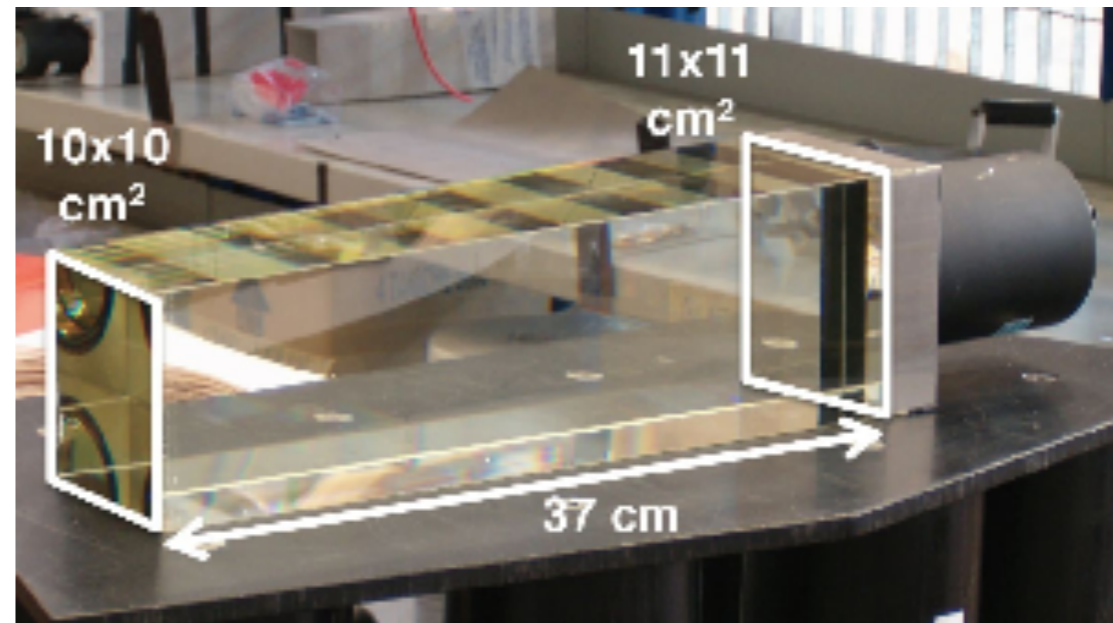
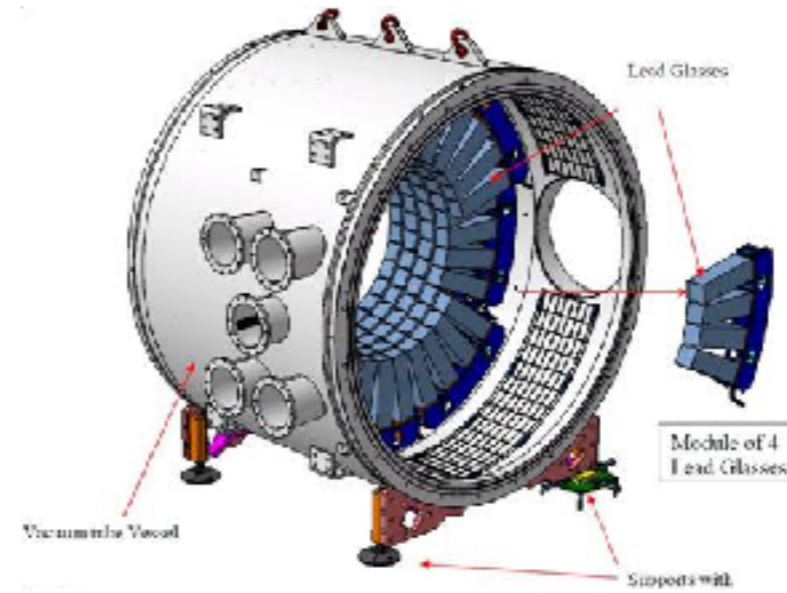
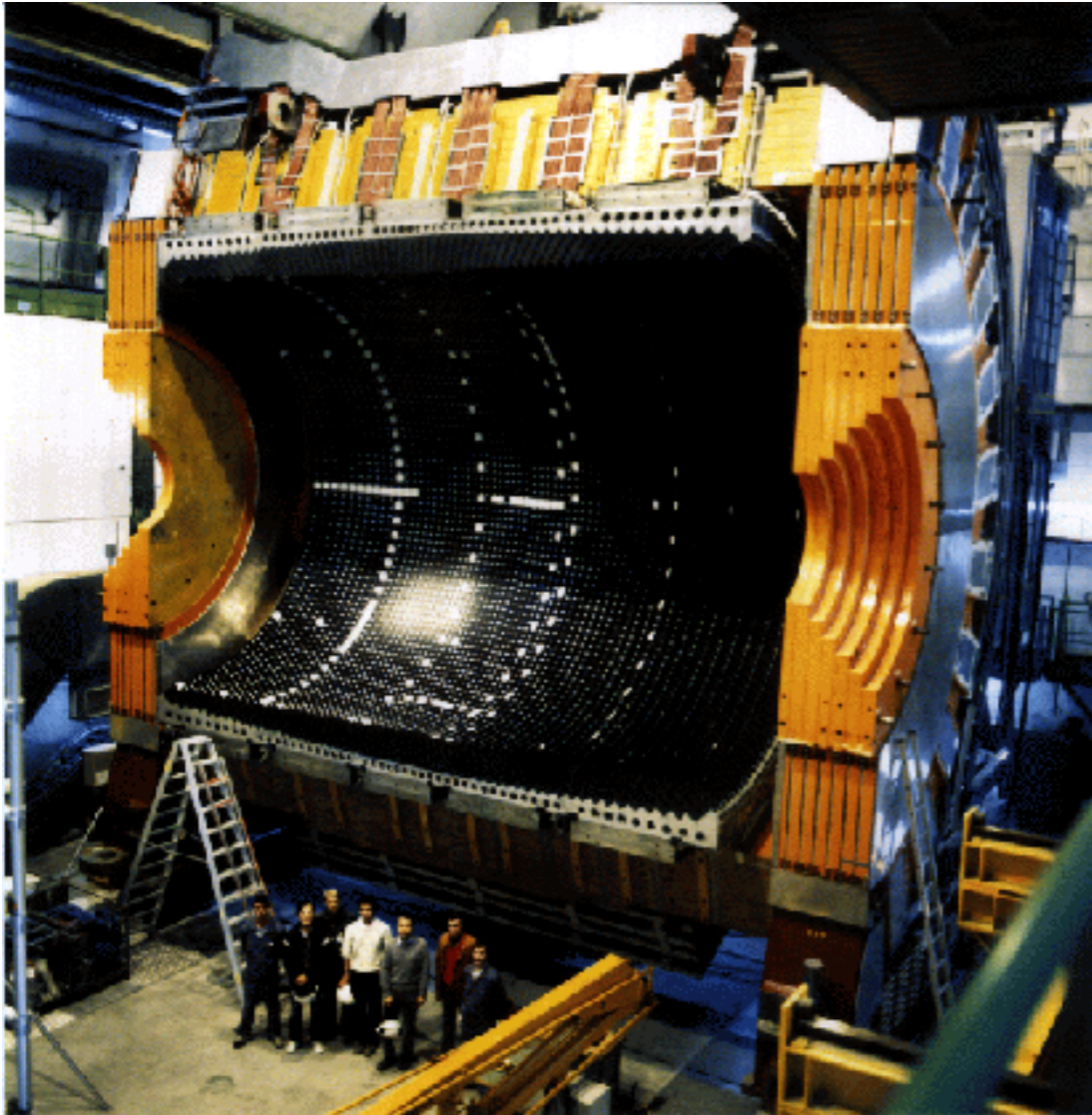
- Super Kamiokande 水チェレンコフ



- Belle II TOP Counter : Quartz Cherenkov



- OPAL lead glass calorimeter -> N62 LAV



γ 線

- 中性粒子 : 荷電粒子に変換

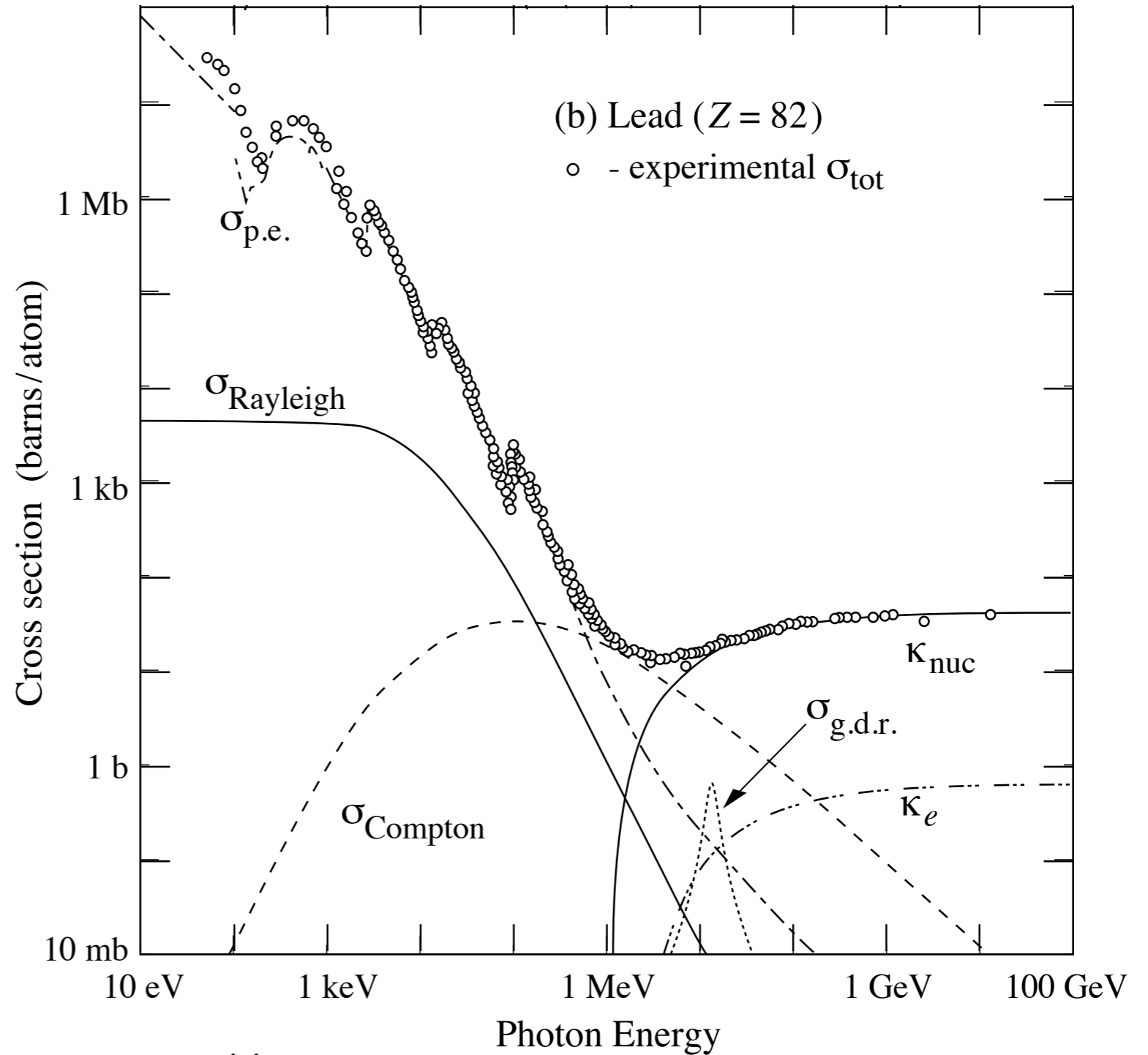
- γ 線

- 光電効果

- コンプトン効果

- 対生成

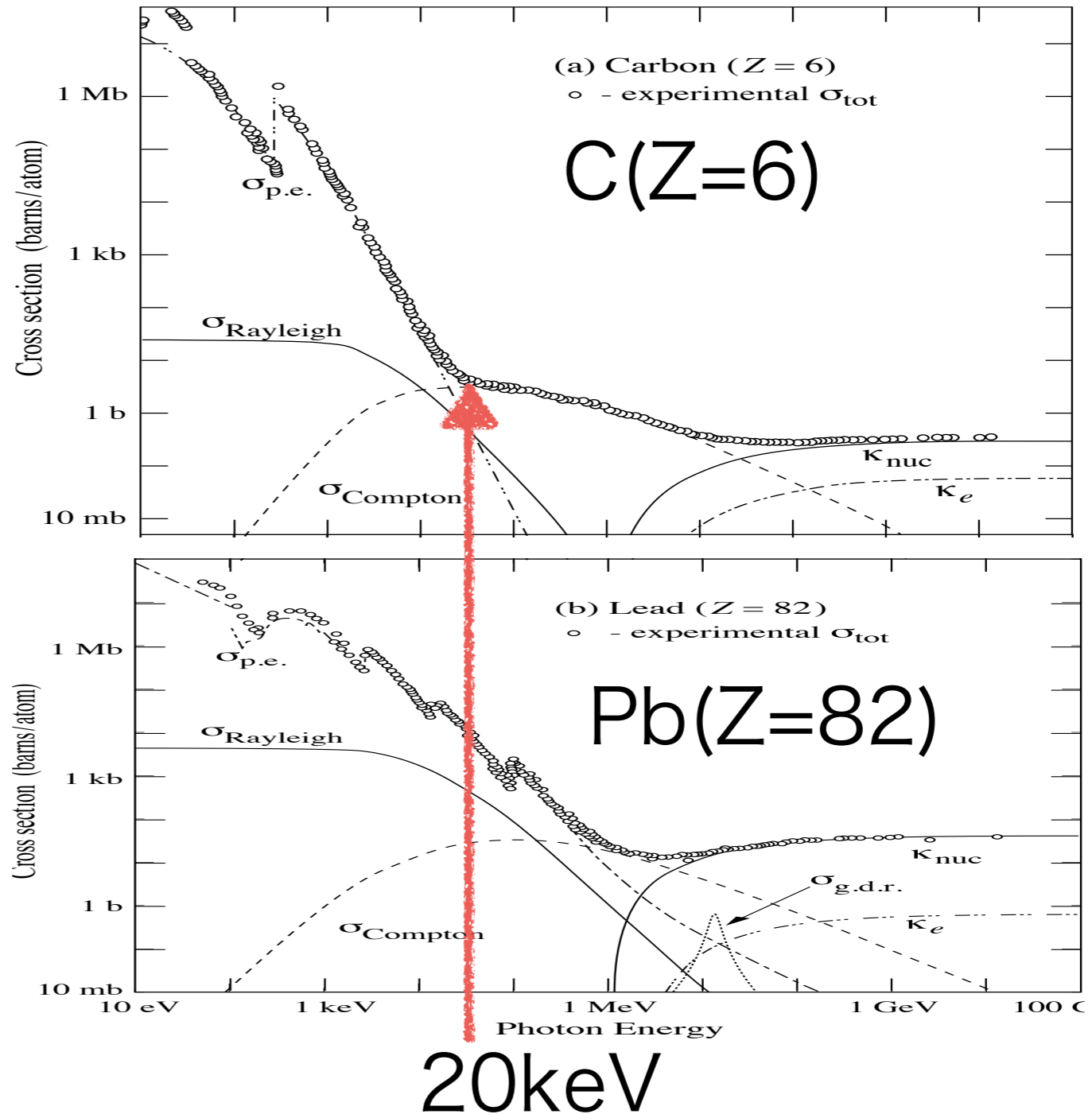
- 光核反応



光電効果

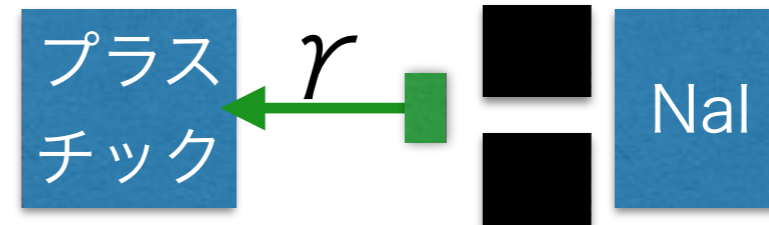
- γ 線 \rightarrow 電子 ($\sim E_\gamma$)
- Z依存が大きい Z^{-5}
 - C: $\sim 10\text{keV}$ くらいから
 - Pb: $\sim 1\text{MeV}$
- 殻の効果

束縛電子システム

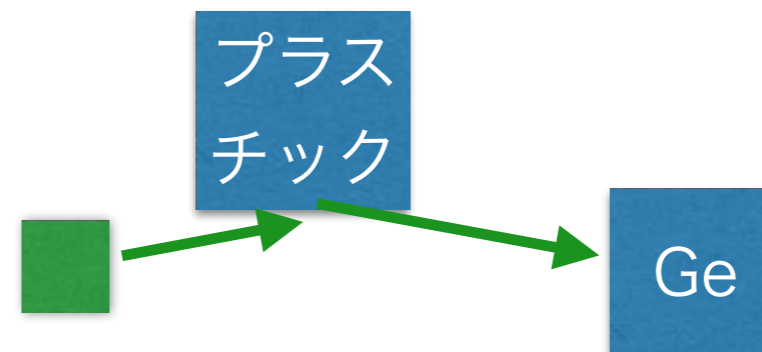


コプトン散乱

- γ 線 \rightarrow ~自由電子 \rightarrow 電子 + γ



- 角度と E_γ の相関



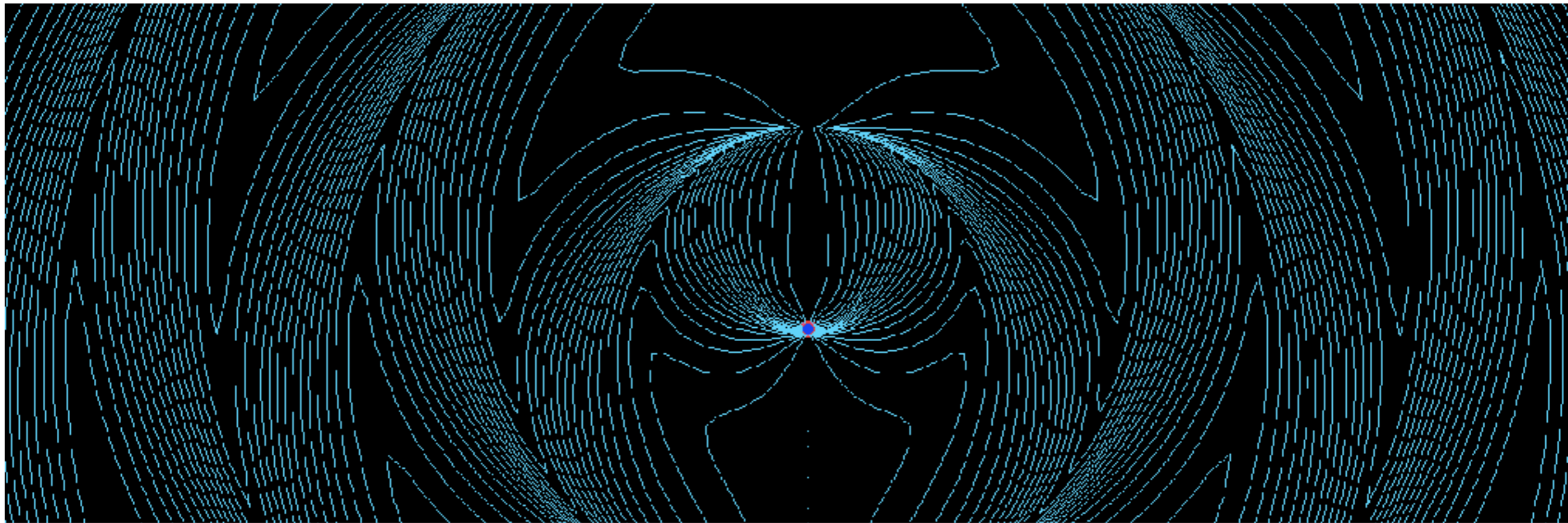
- Zに比例

- MeV γ 線の偏光測定

- 光電吸収ピークに漏れこむ。

γ 線の偏光
(Eの向き)

プラスチック
紙面に垂直方向に
散乱しやすい



対生成

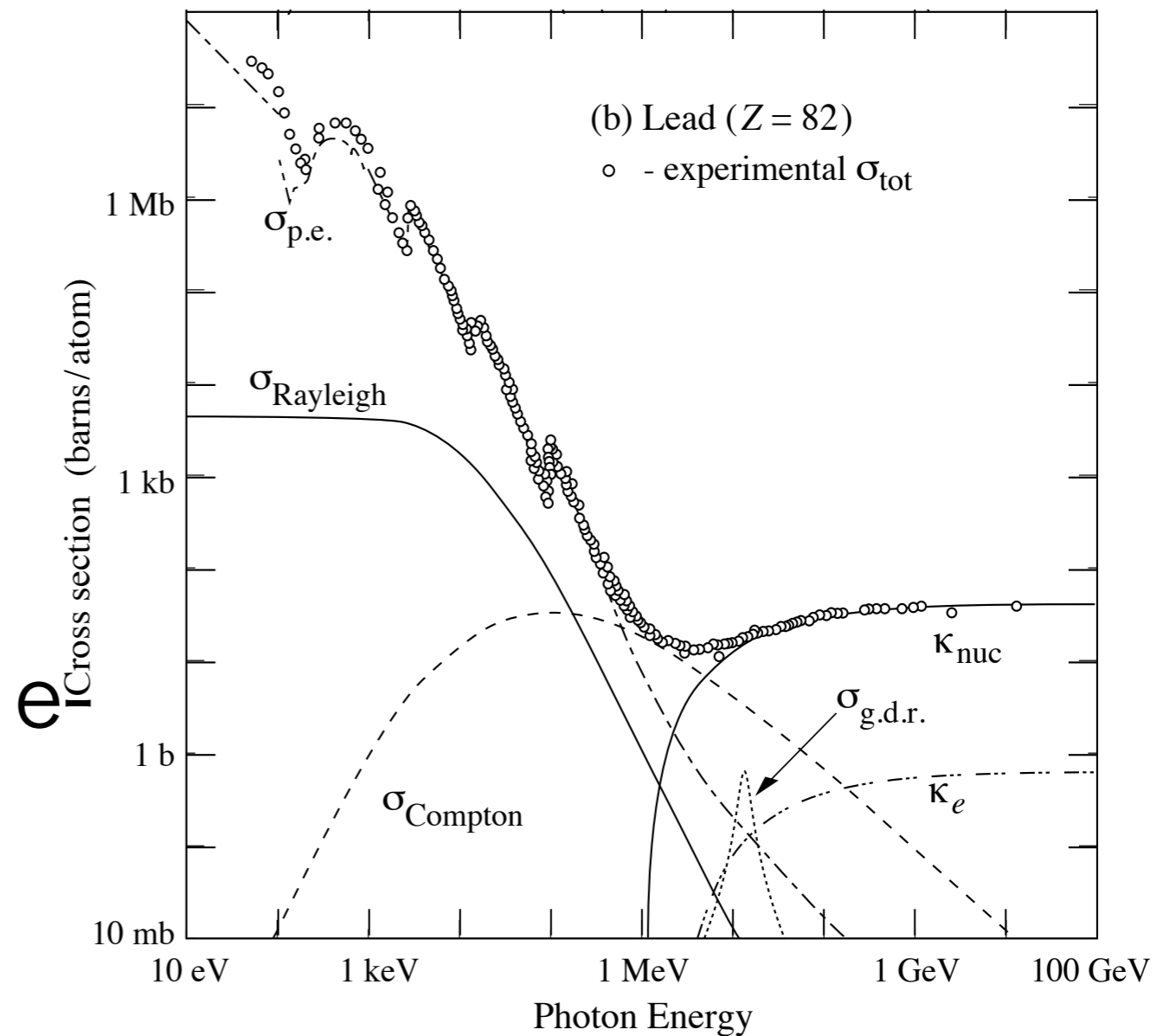
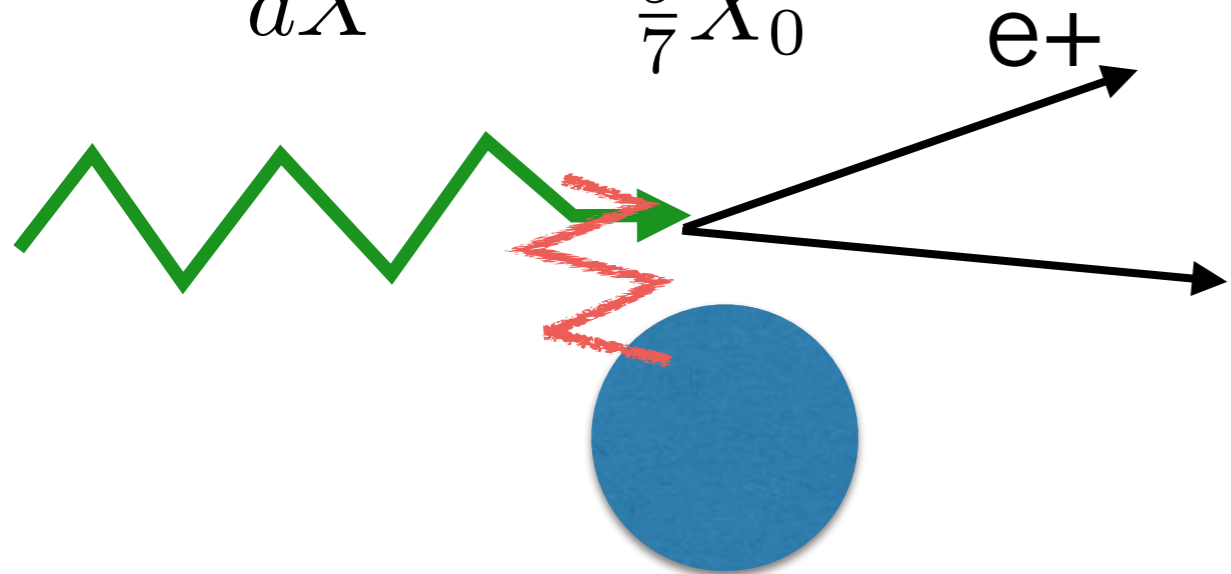
- High energyの領域でのみ断面積が X_0 で決まる。

- Z^2 に比例, X_0 よりちょっと長い

- Conversion track

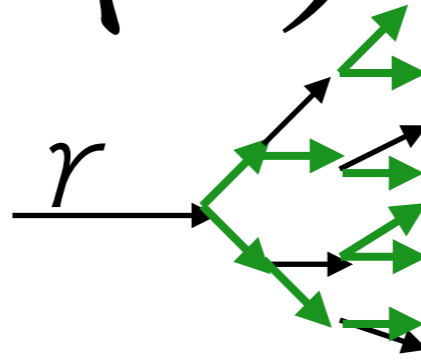
- γ 線のFull reconstruction

$$-\frac{dN_\gamma}{dX} = -\frac{N_\gamma}{\frac{9}{7}X_0}$$



電磁シャワー

- Full coverage -> ~27X0



横には大きくは広がらない

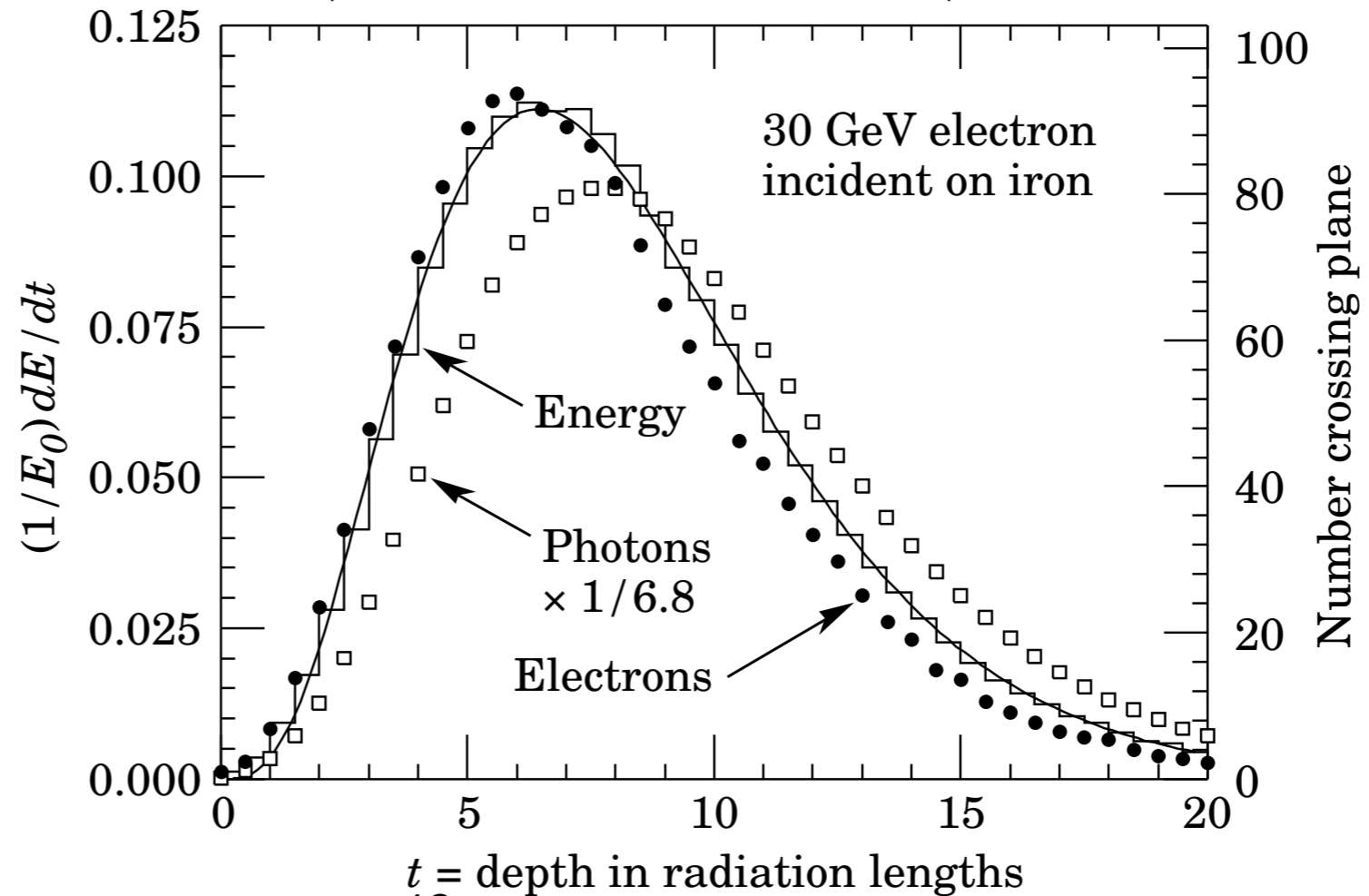
- Shower max = $\ln(E/E_c) + 0.5(\gamma)$ or $-0.5(e)$

- Fe : $E_c \sim 20$ MeV -> $\ln(30\text{GeV}/20\text{MeV}) - 0.5 = 6.8$

Energyが倍
-> 1X0変わる
-> Log依存性

$$dt = \frac{dE}{E}$$

$$t = \ln E + C$$



信号の取り出し方

- 荷電粒子 -> 検出器(物質)にエネルギー
 - 分子、原子の励起、イオン化、など にばらまく
- たくさんの励起子に変換して、その数を数える。
 - 励起状態 -> 脱励起 -> シンチレーション光 (赤外、可視光、紫外光)
 - 電子、イオン対
 - 電子、ホール対
 - クーパーペアのブレイク、フォノン、泡、蒸気、AgBrの感光、DNAの損傷、

光

- 世の中、光は身近（我々が感じることができる）
- 高感度センサーがある
 - 光 → 光電子（ここでも中性 → 荷電）
 - PMT
 - 光を電子、ホールペア
 - Photo diode, Avalanche PD, SiPM(MPPC)
 - CMOS, CCDなど

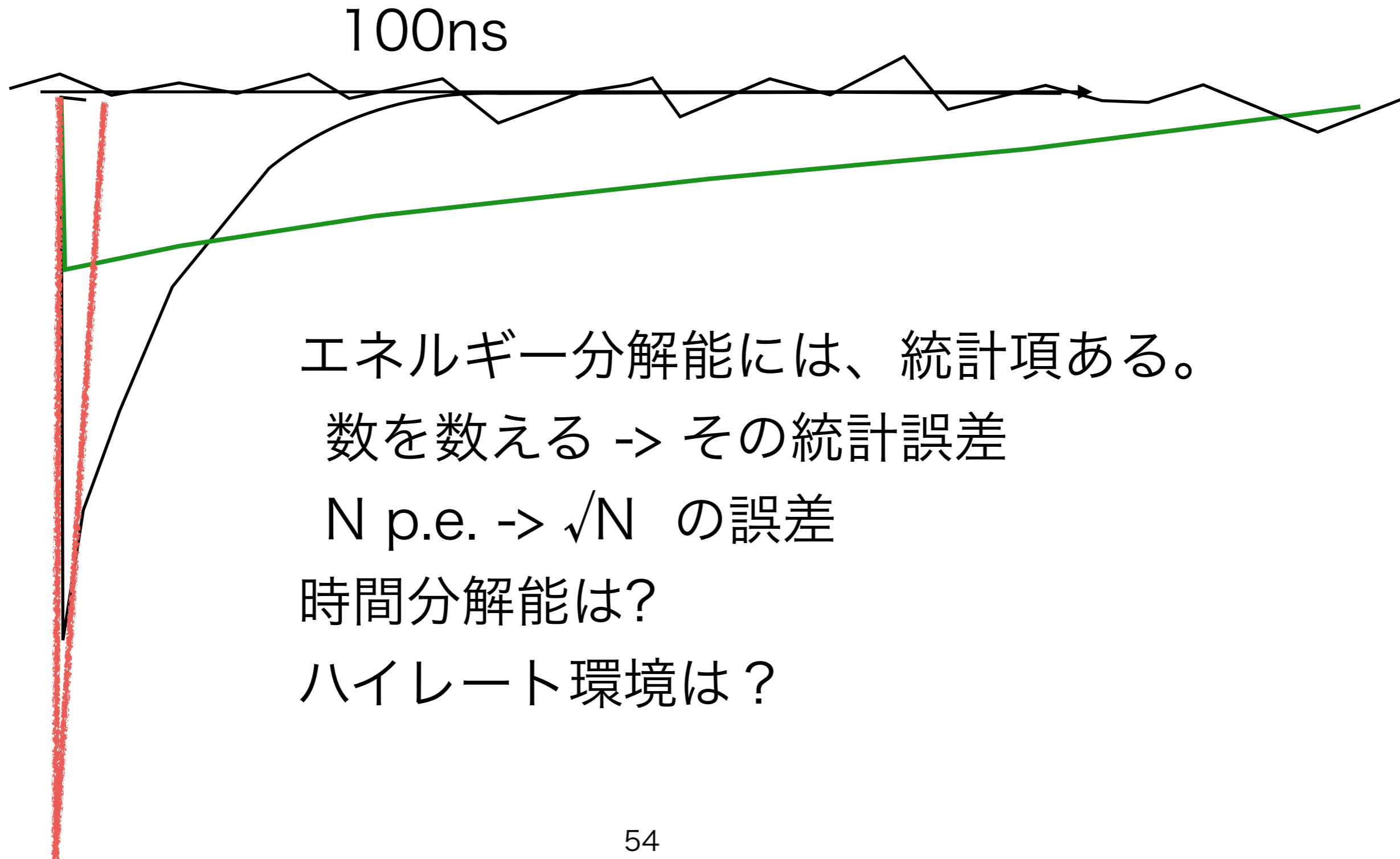
光るもの

- 結晶シンチレータ (脱励起のdecay time)
 - NaI, CsI, GSO, PbWO₄, LaBr,
- 樹脂シンチレータ (脱励起のdecay time)
 - 透明基材(励起) -> 蛍光剤(可視光レベルへ)
- チェレンコフ(瞬間的)
 - アクリル、石英、エアロゲル、ガス、

励起をつくるエネルギー損失

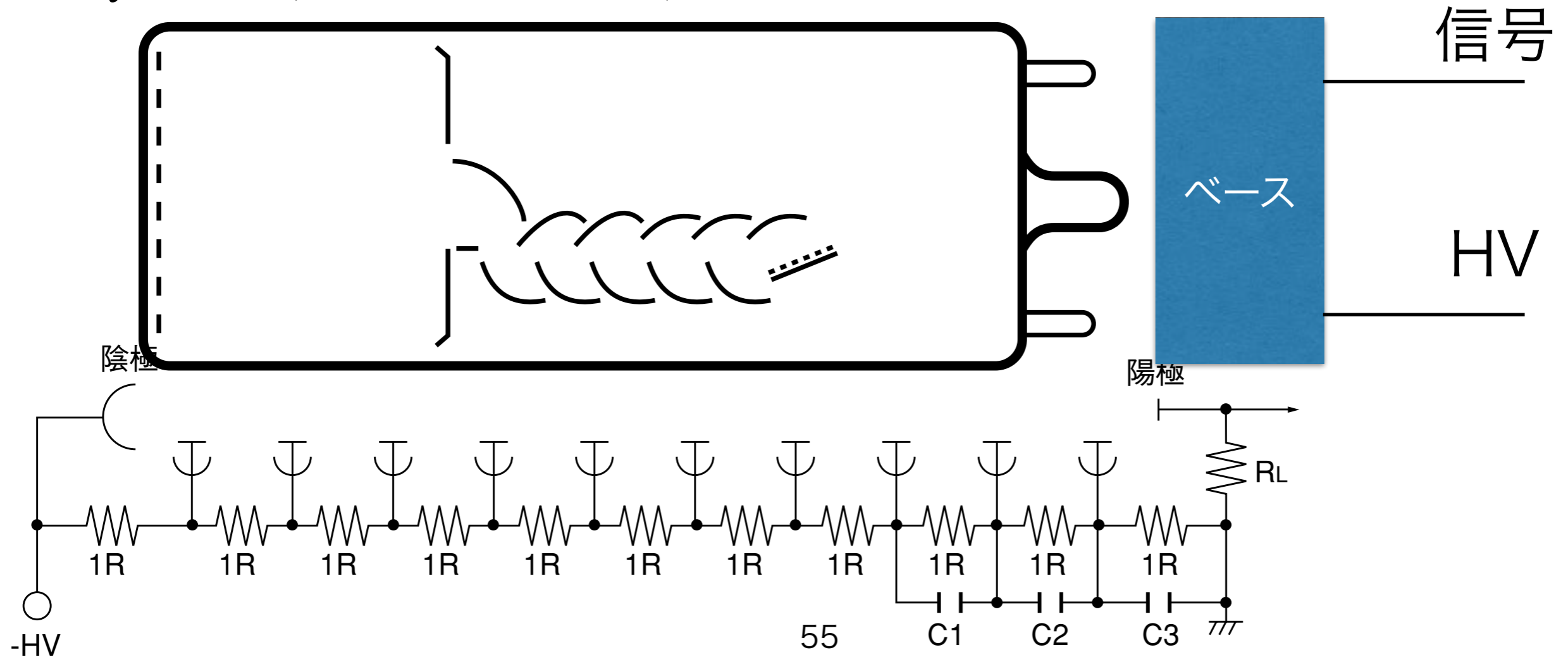
- NaI(Tl) : 25eV
- プラスチックシンチレータ : 100eV
- Undoped CsI : 500eV
- PbWO₄ : 6000eV
- エアロゲル : 5cm厚MIPで30photonくらい
 - (PMTなど条件次第)

発光量、時間応答

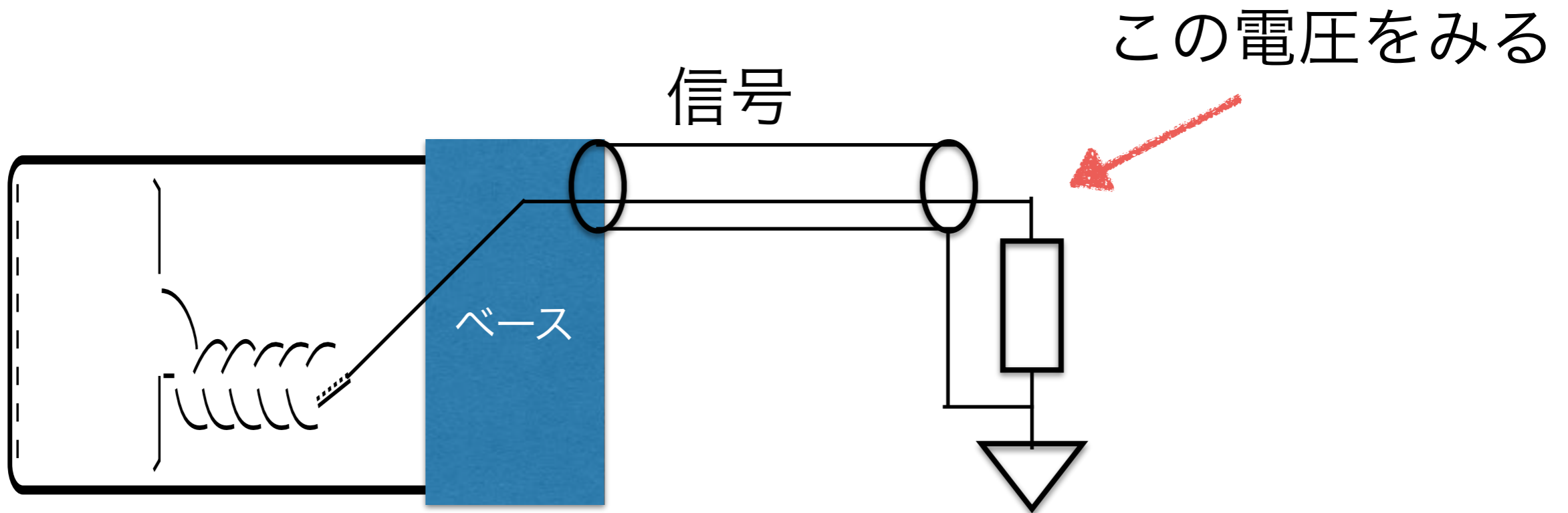


PMT

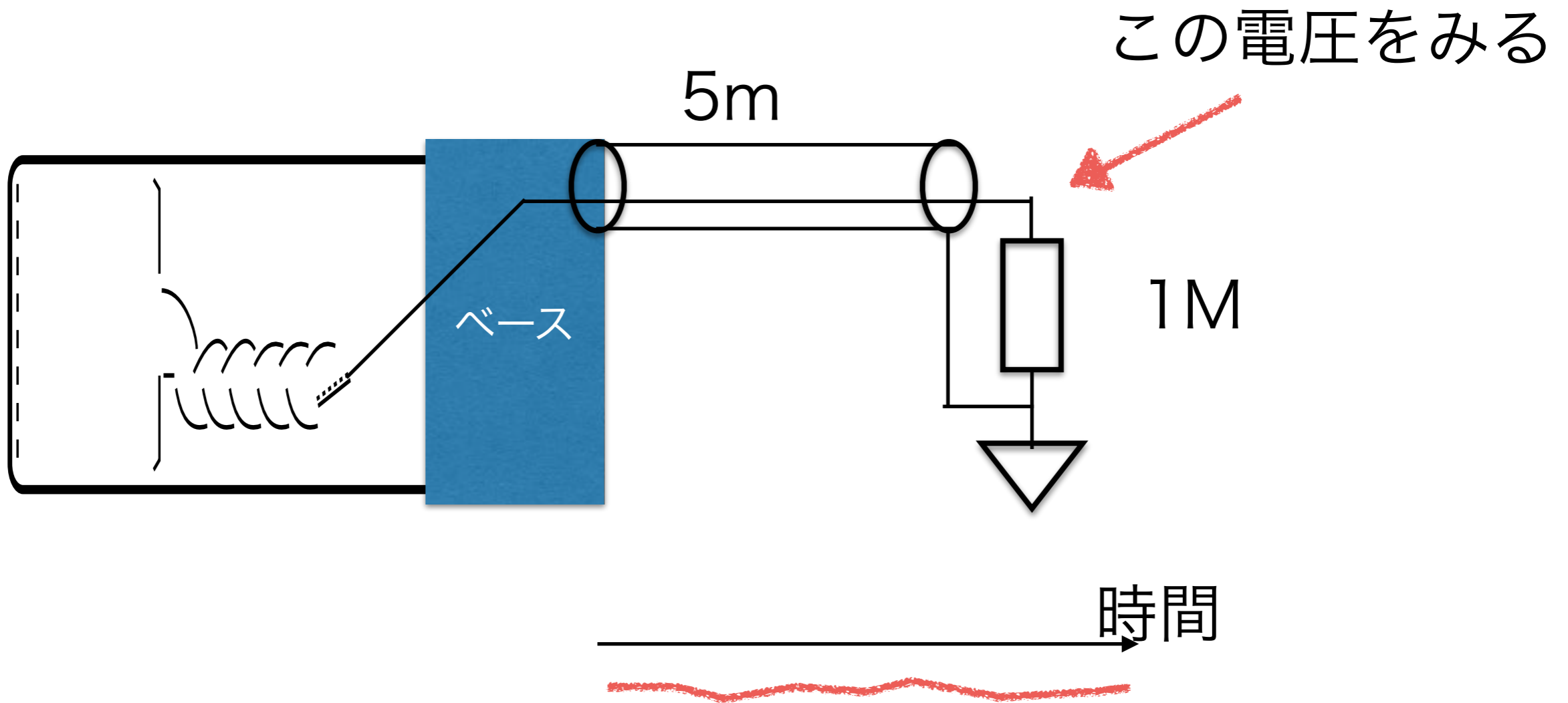
- 家電製品なみの使いやすさ
- Single photon検出可能な高いS/N
- 光(a few eV) -> 光電効果(QE) -> 光電子
- Dynode(アルカリ金属) -> 2次電子放出で増倍



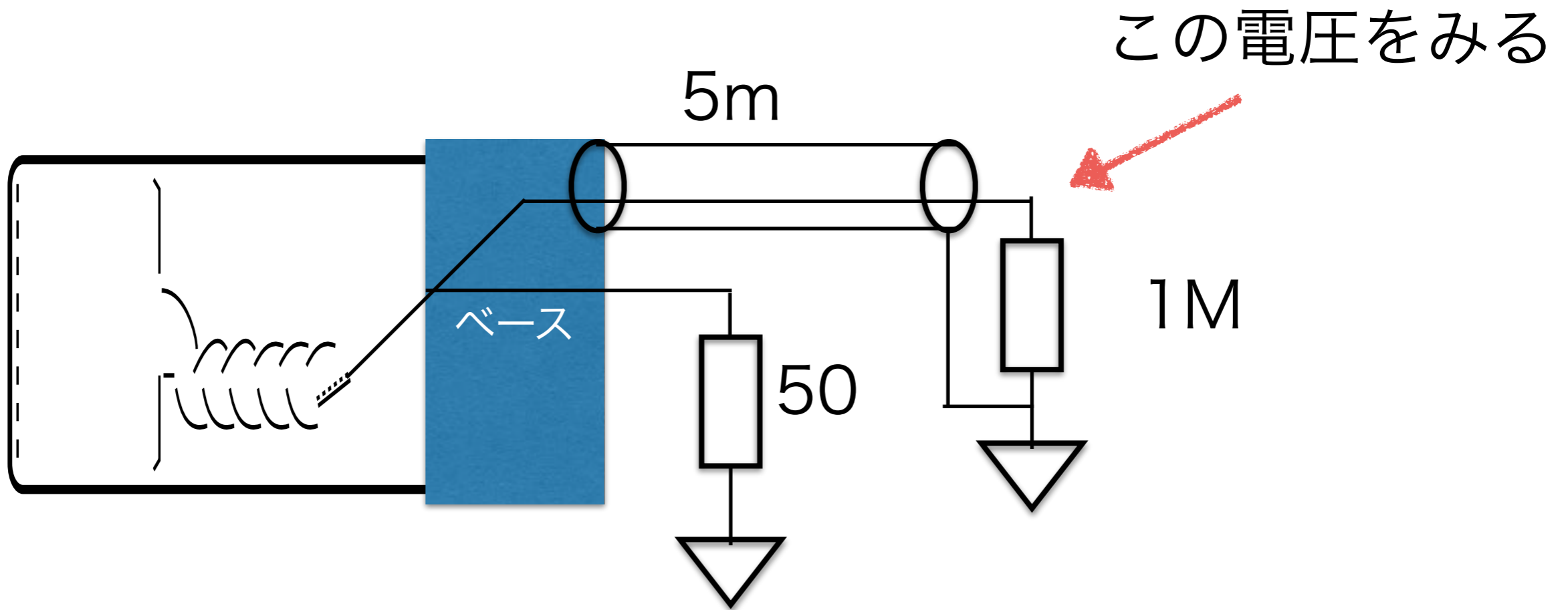
抵抗でI-V変換
何オームがよい？



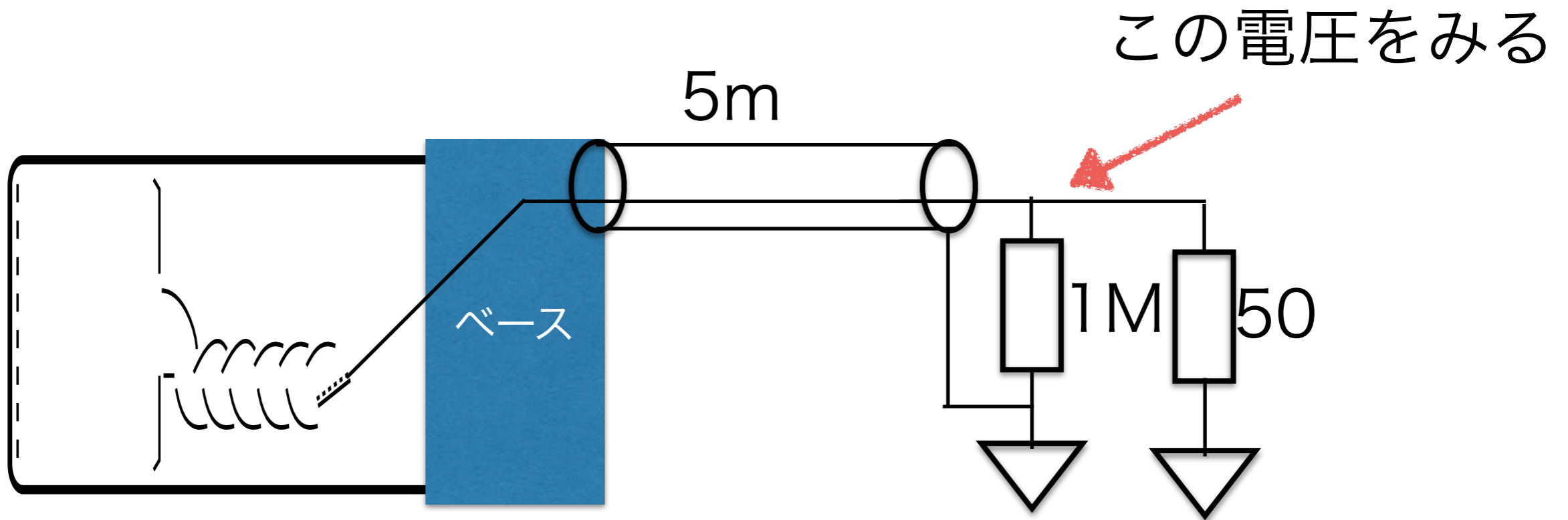
抵抗でI-V変換
何オームがよい？



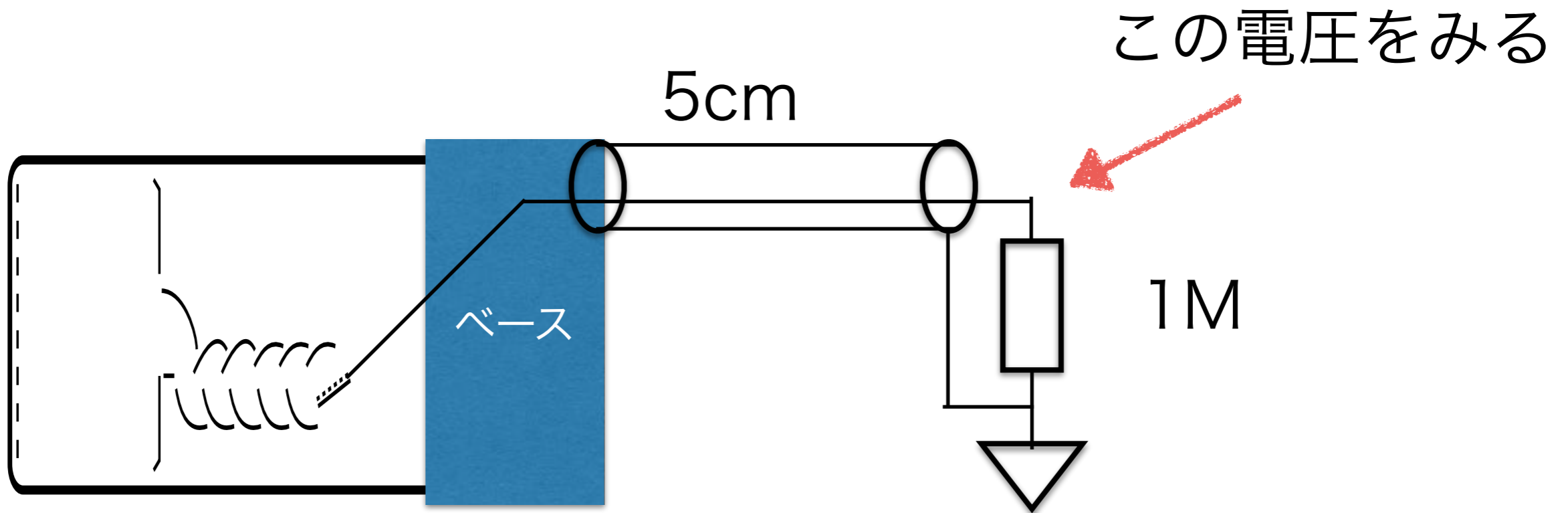
抵抗でI-V変換
何オームがよい？



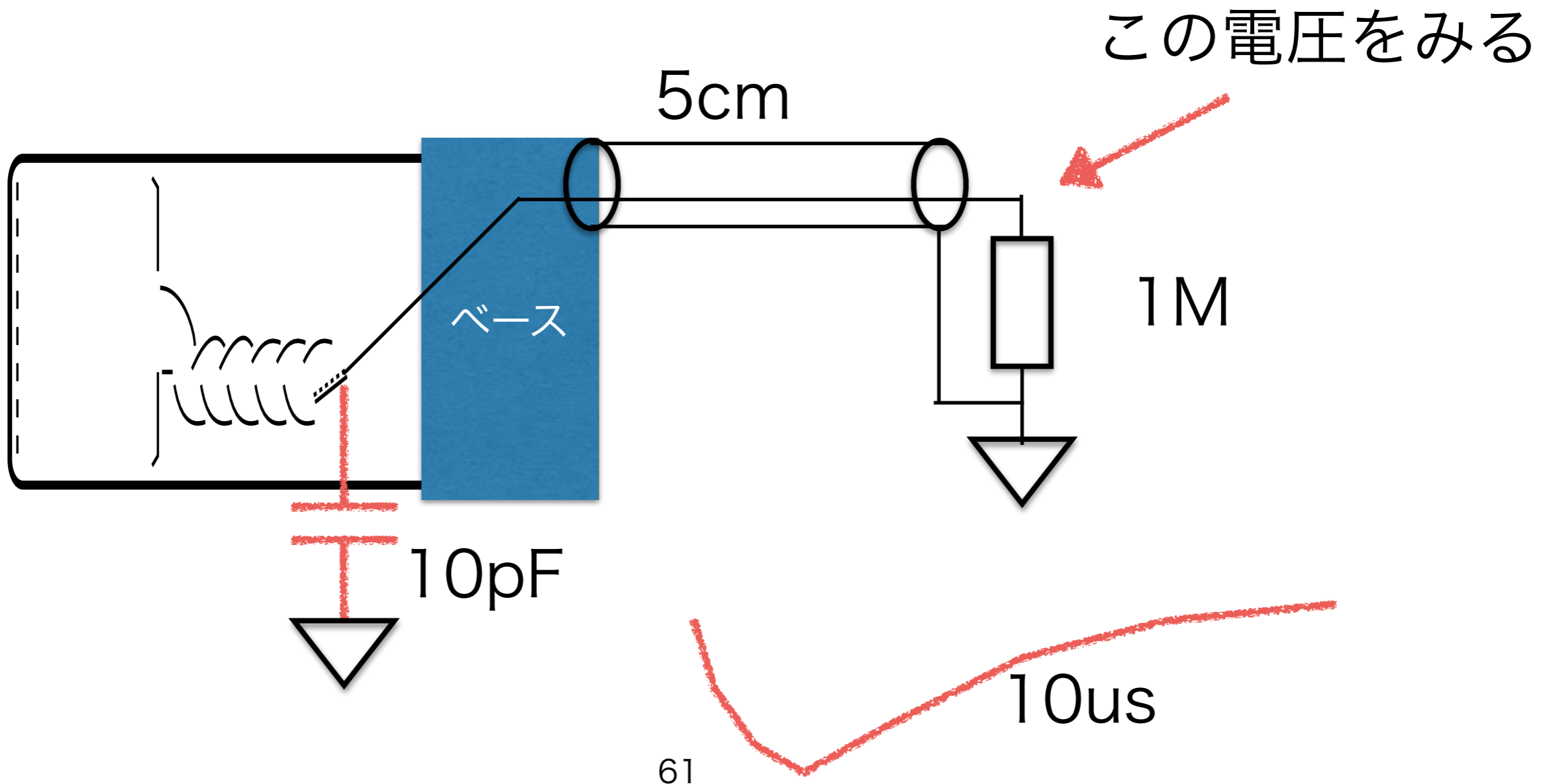
抵抗でI-V変換
何オームがよい？



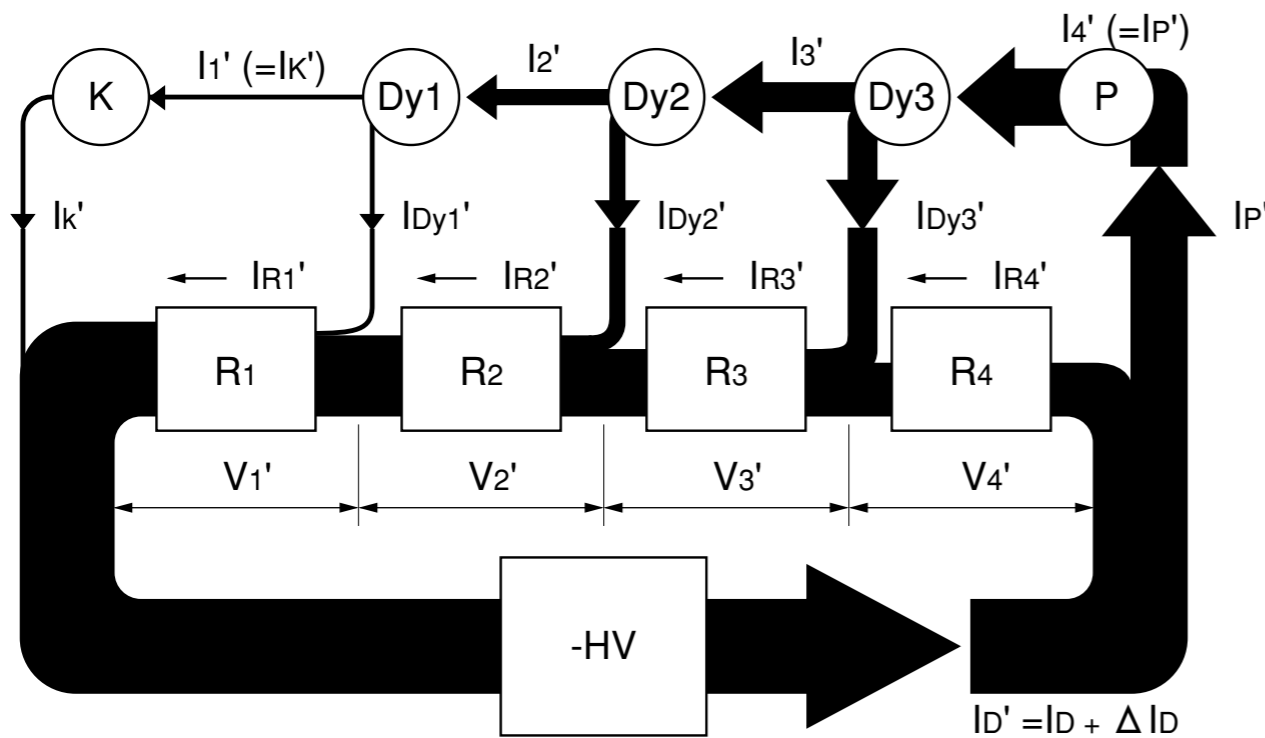
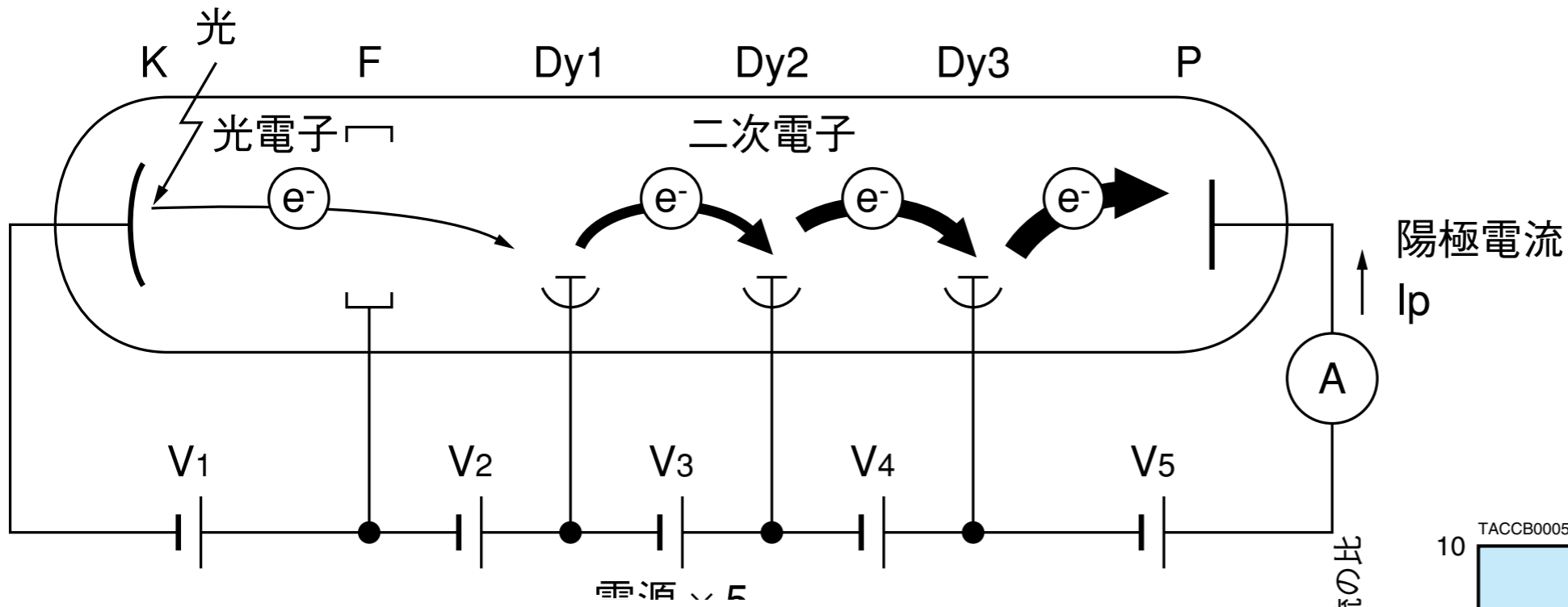
抵抗でI-V変換
何オームがよい？



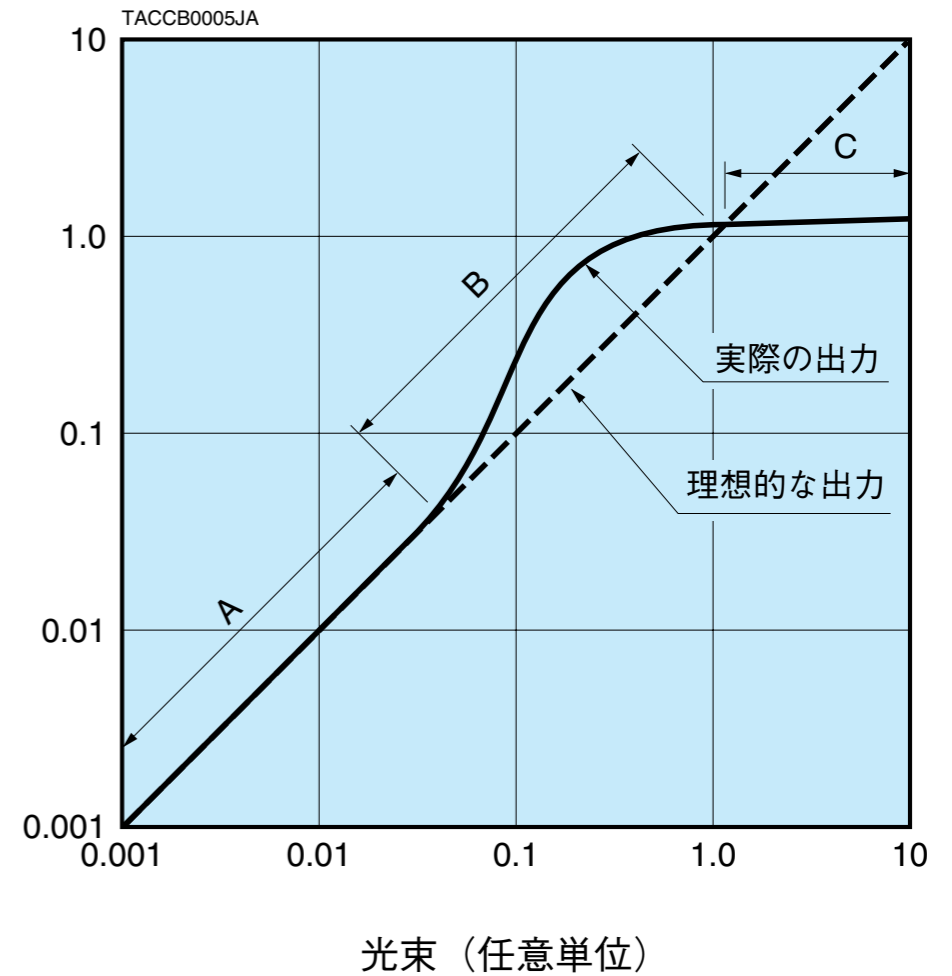
抵抗でI-V変換
何オームがよい？

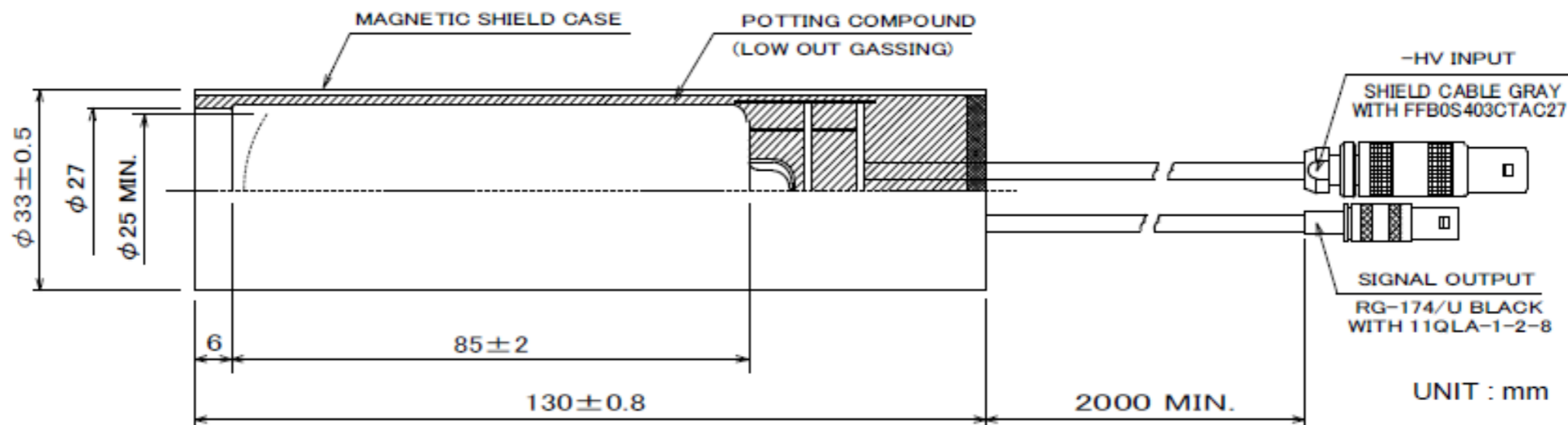


ベースも大事



デバイダ回路電流に対する平均陽極電流の比



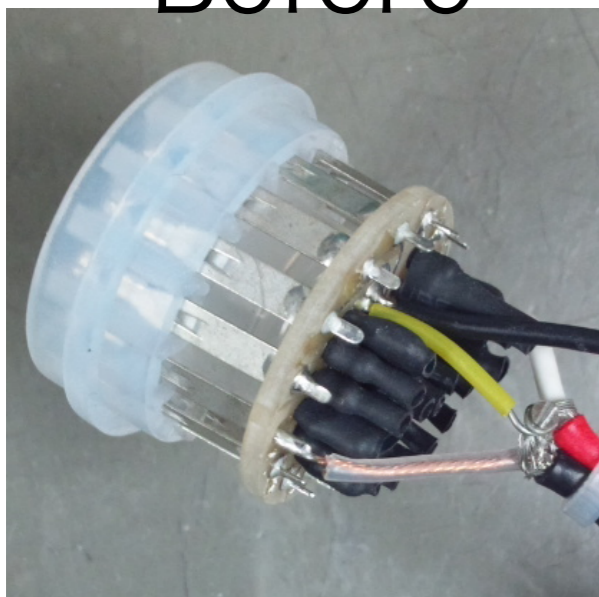


H7415VMOD
WITH LOW OUT GASSING

DIMENSIONAL OUTLINE AND VOLTAGE DIVIDER CIRCUIT

DATE : 21.Dec.2011
Ref.#7415-111221

Before



After



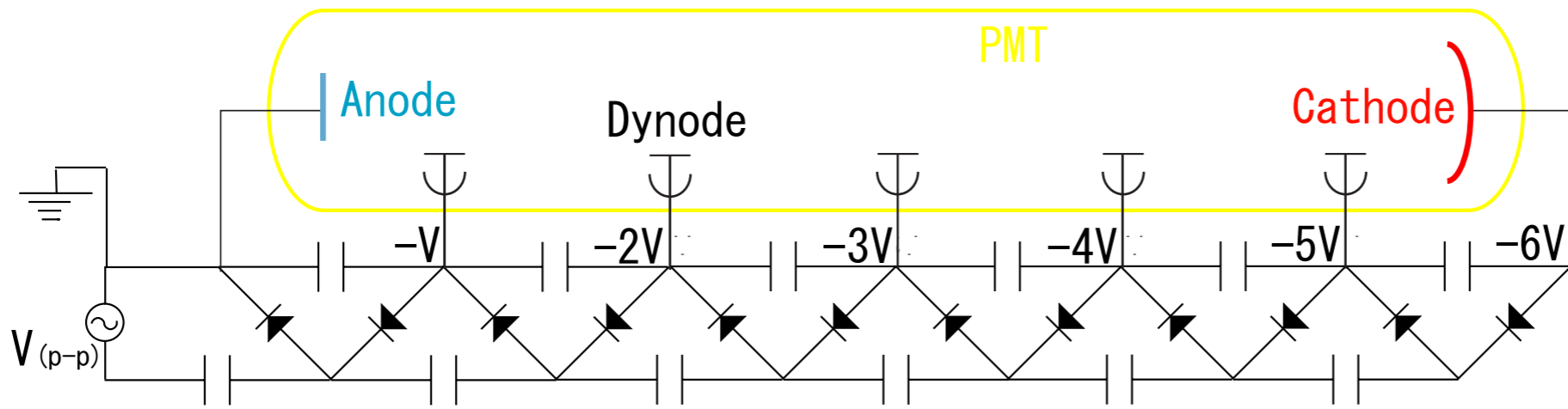
Linearity -> ベース電流

真空中 -> 放電

Potting -> 発熱

-> ベース

ビーム強度変動

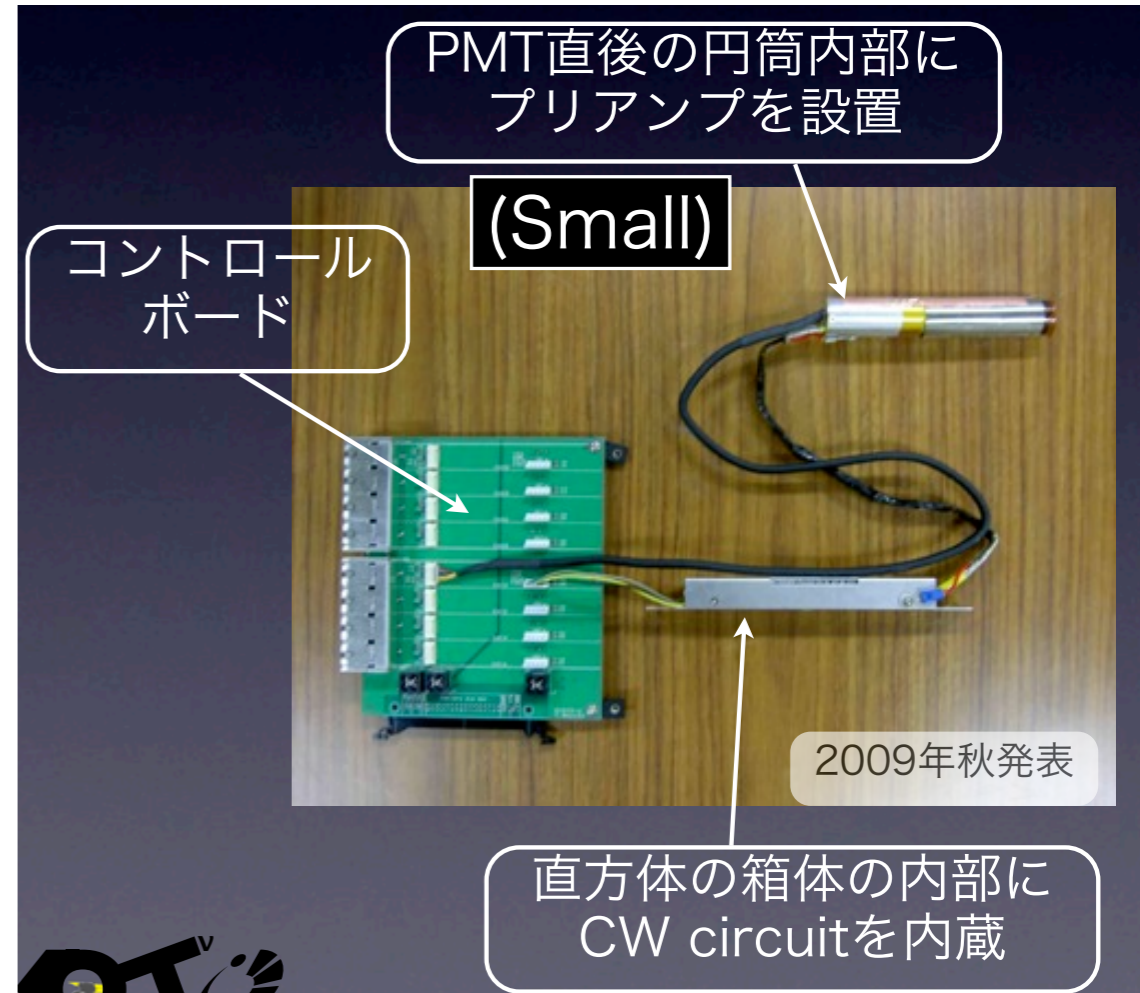
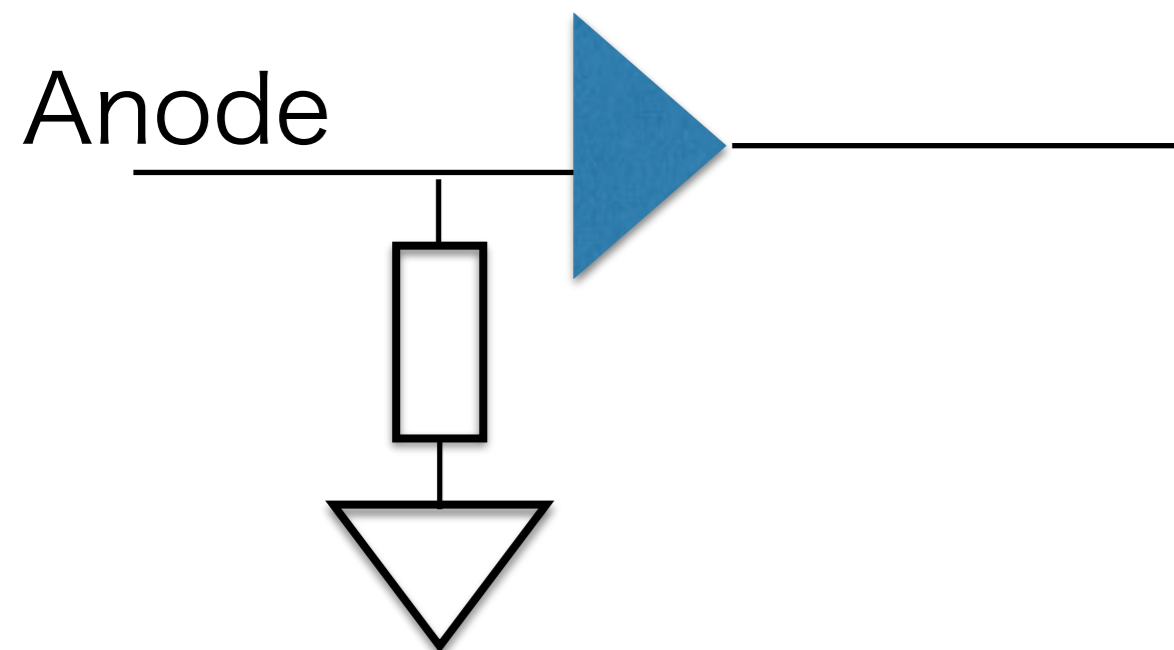


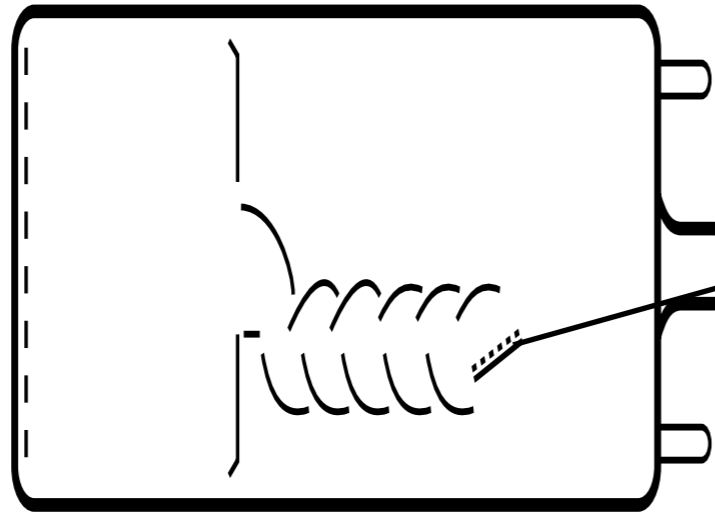
抵抗分割比
Gain変わる

Cockcroft-Walton Base

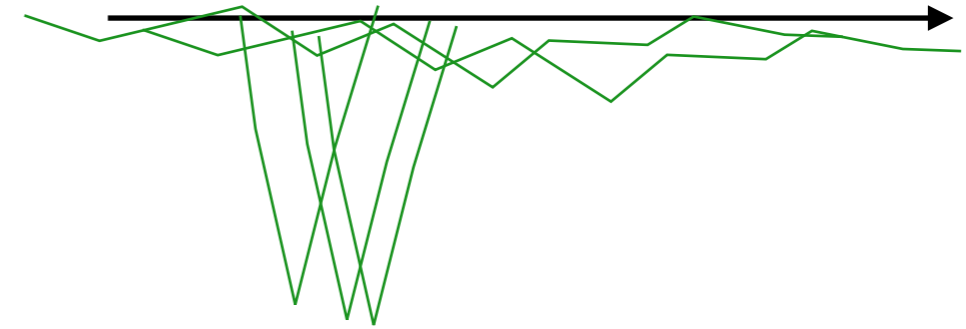
真空中に2700本

低消費電力
低電圧駆動
各段の電位

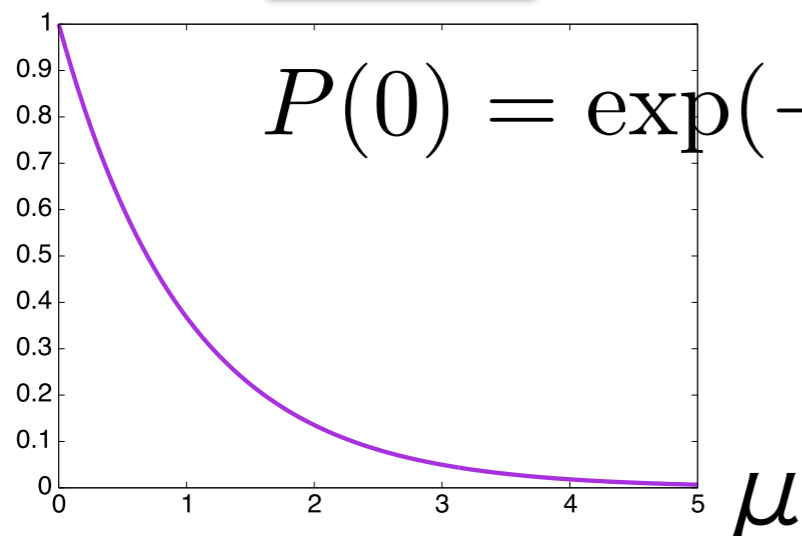




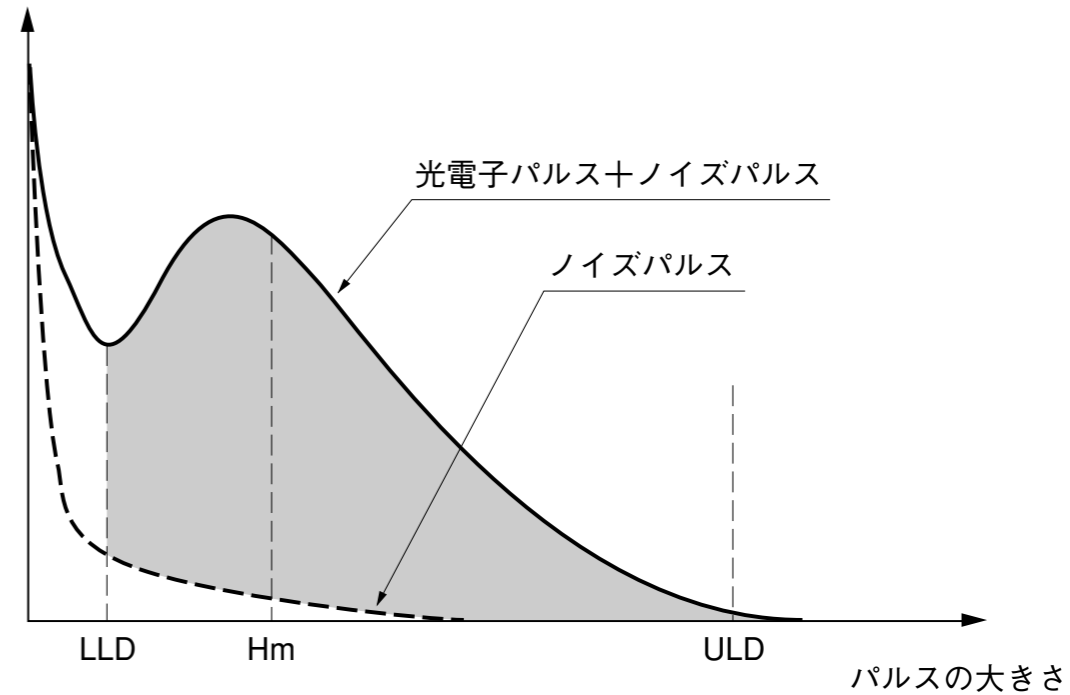
オシロスコープ



パルスジェネレータ



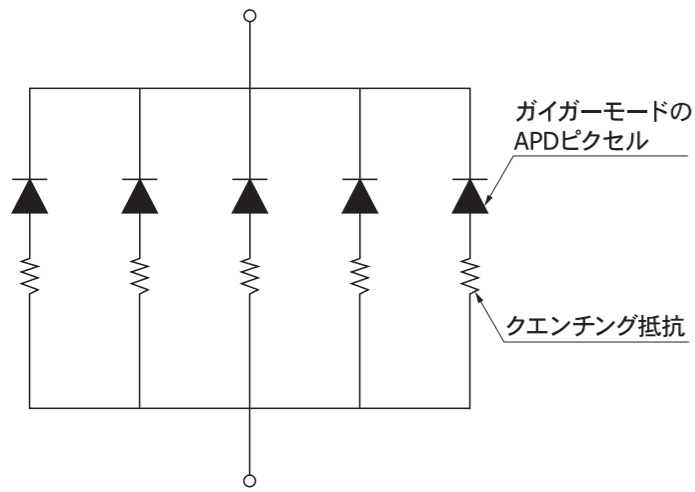
65



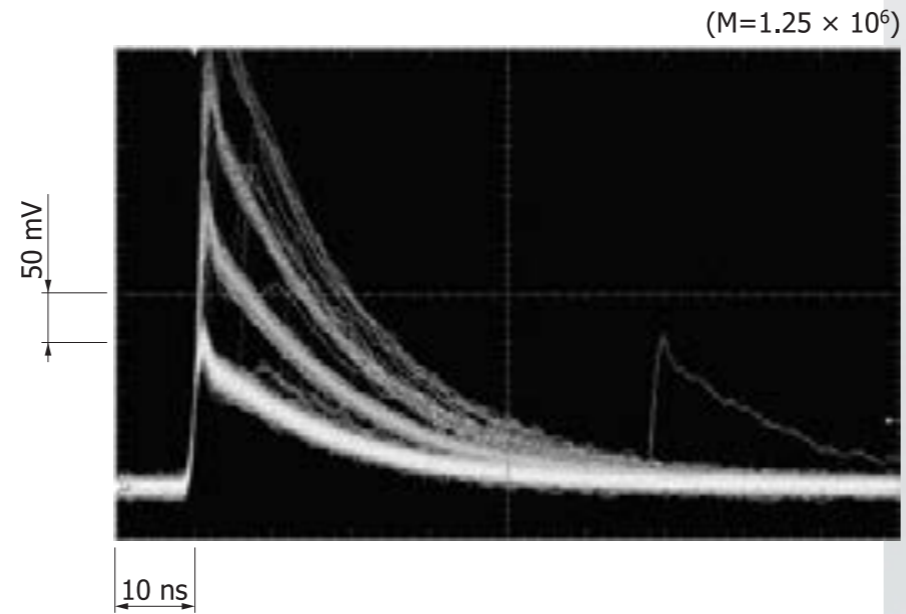
MPPPC

(b) S12571-050C (改善品)

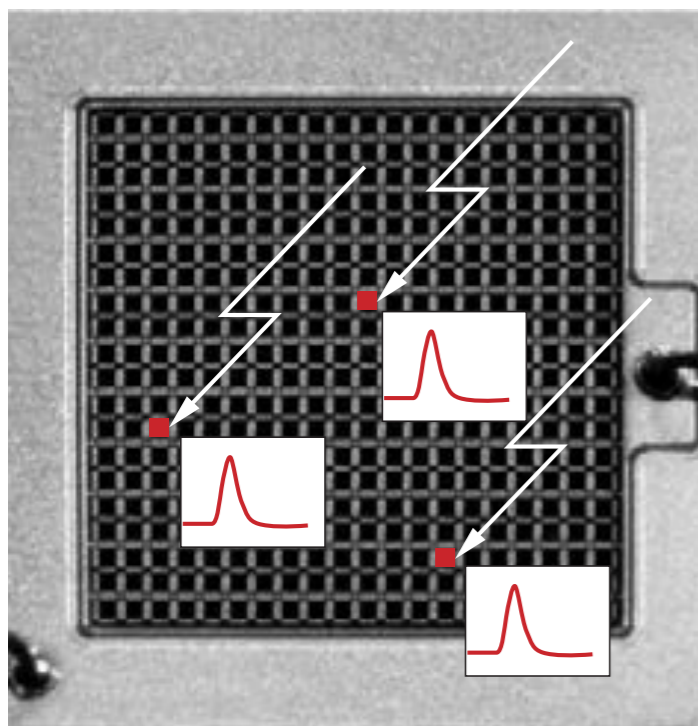
[2-1] 構成



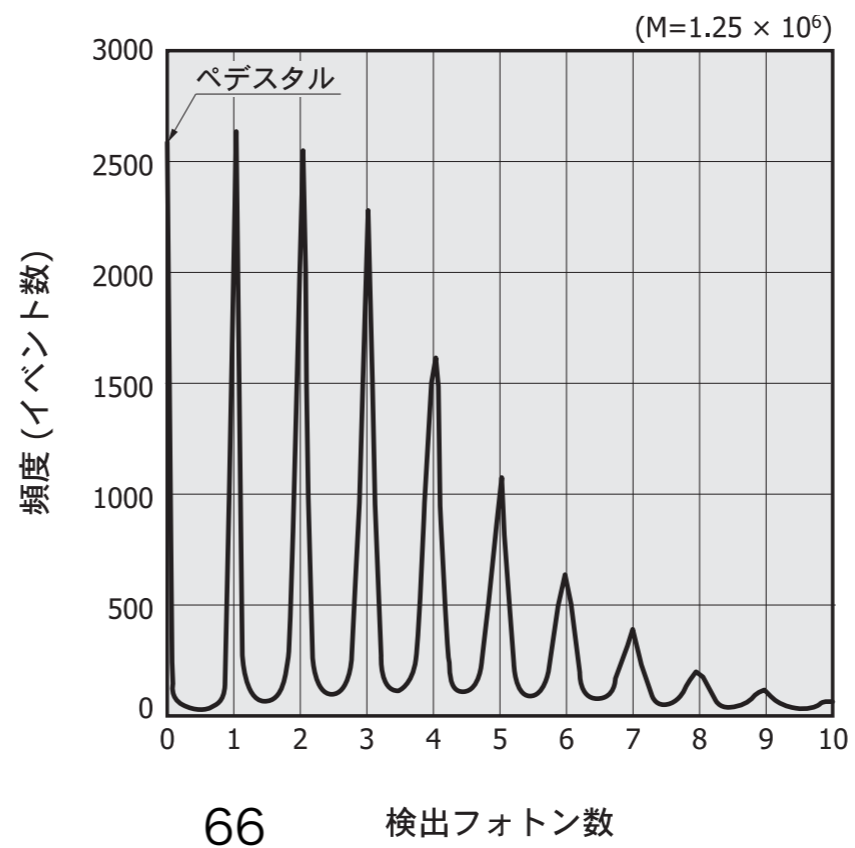
KAPDC0029JA



[2-2] MPPPCによる光子カウンティングのイメージ

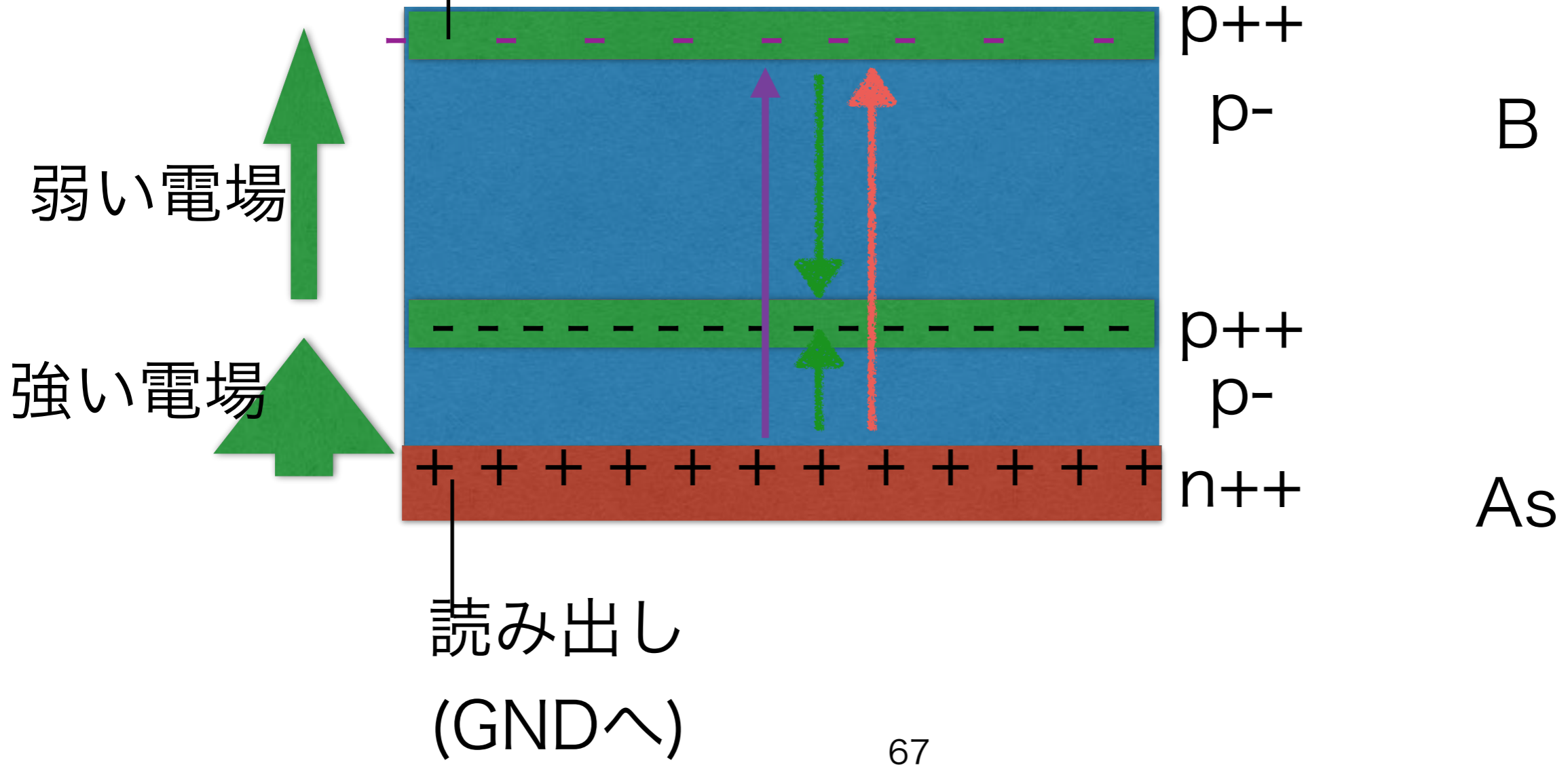


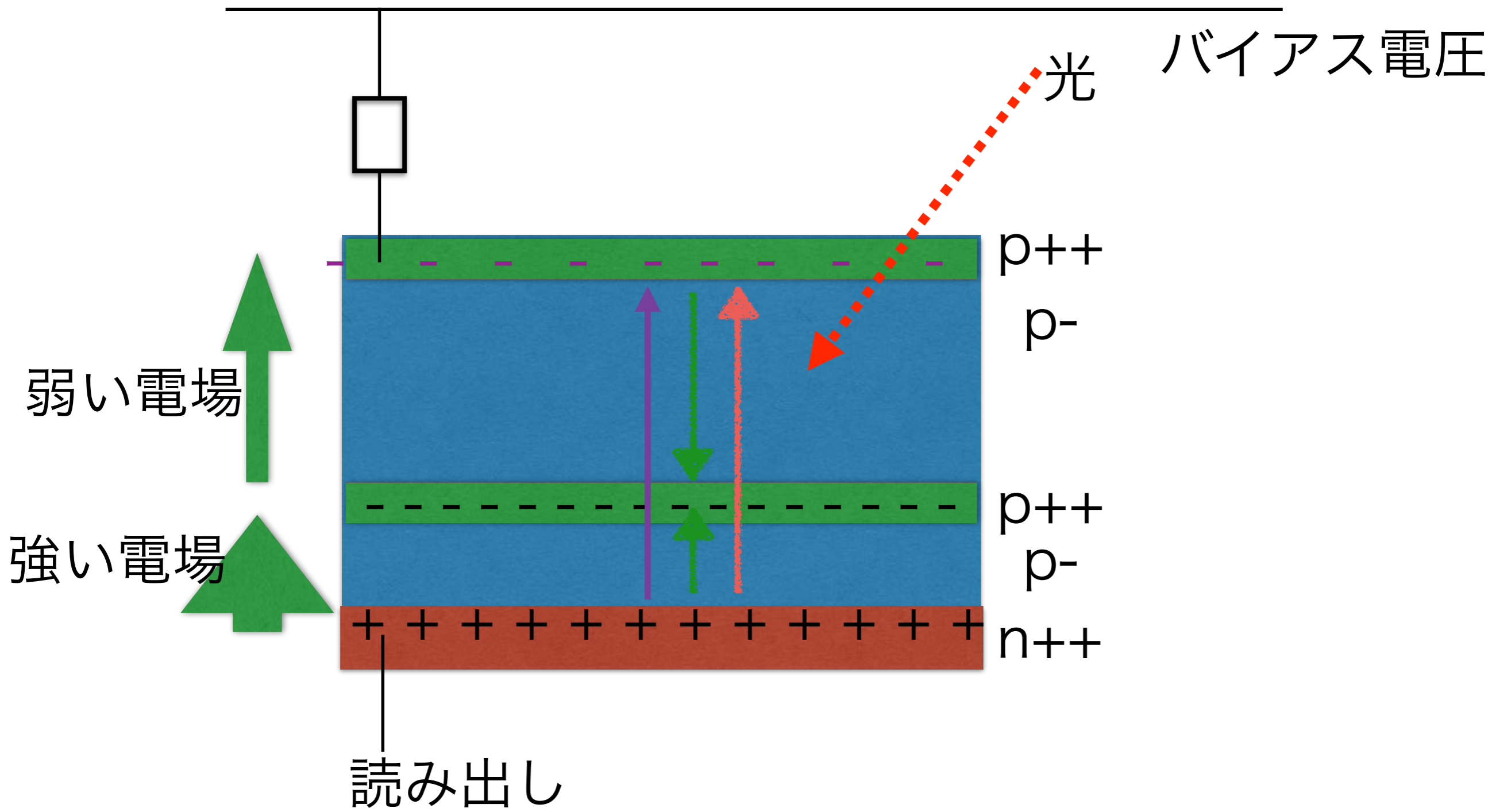
KAPDC0049JA

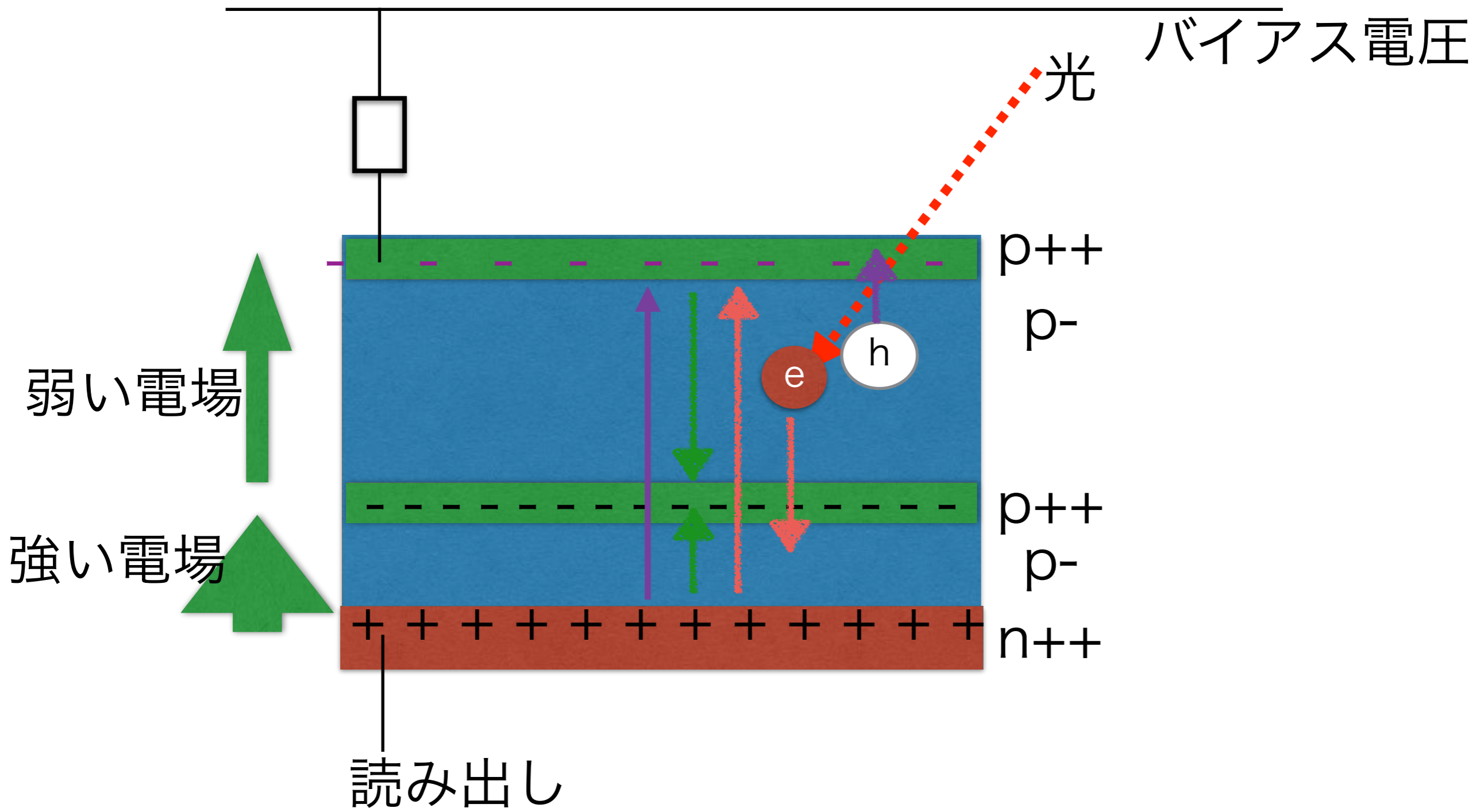


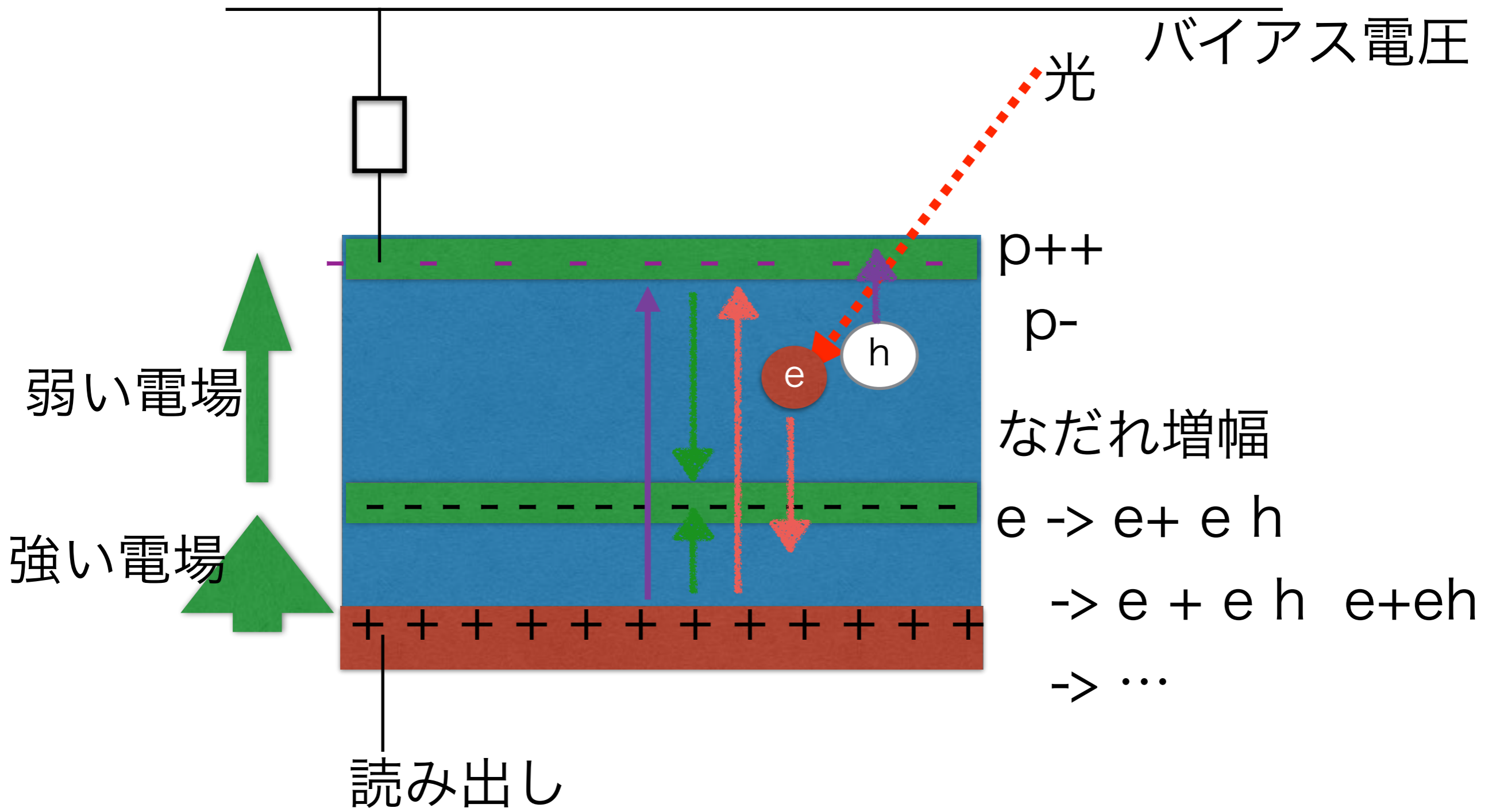
KAPDB0133JA

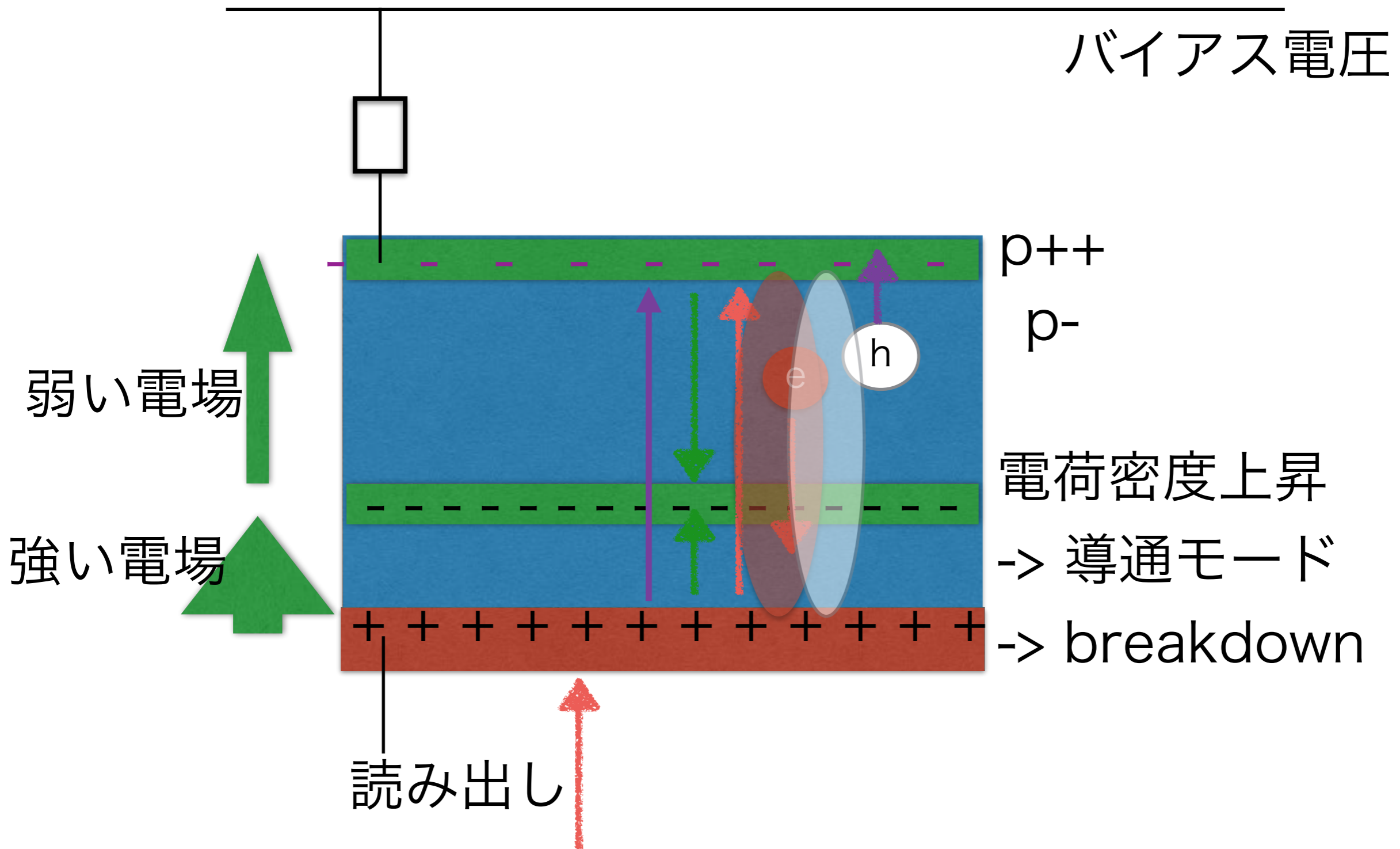
バイアス電圧 $-V$
PN接合に逆バイアス

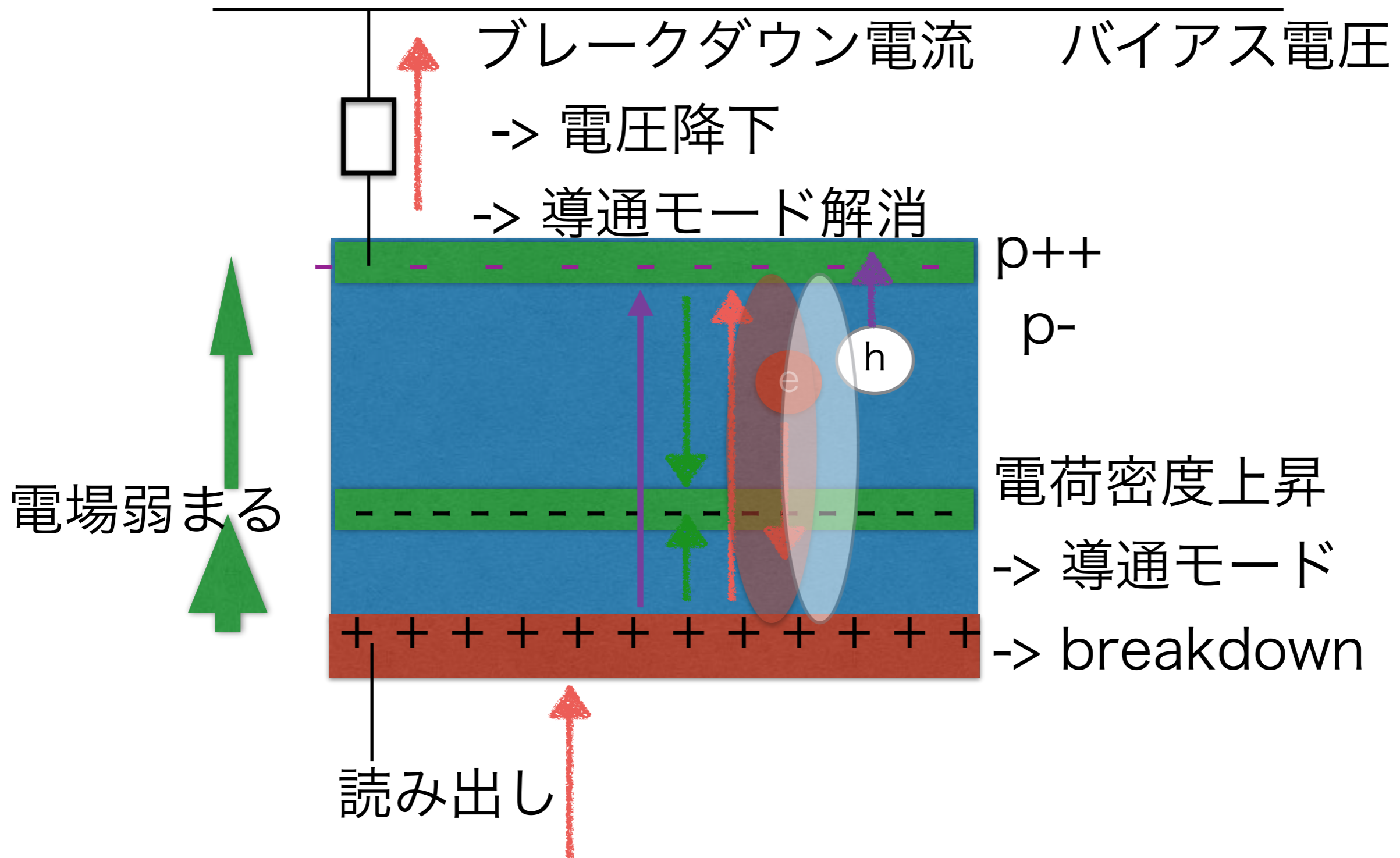


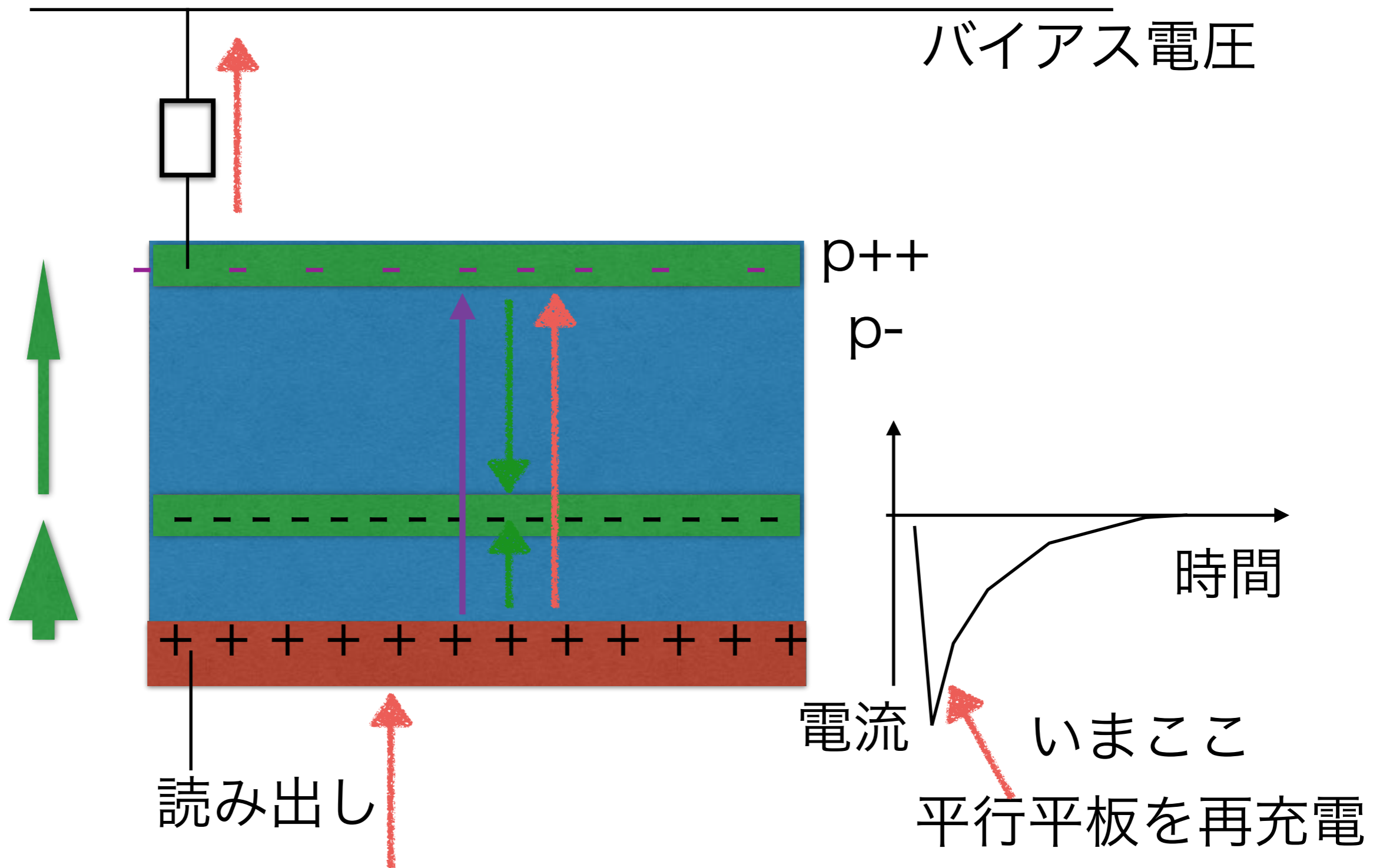




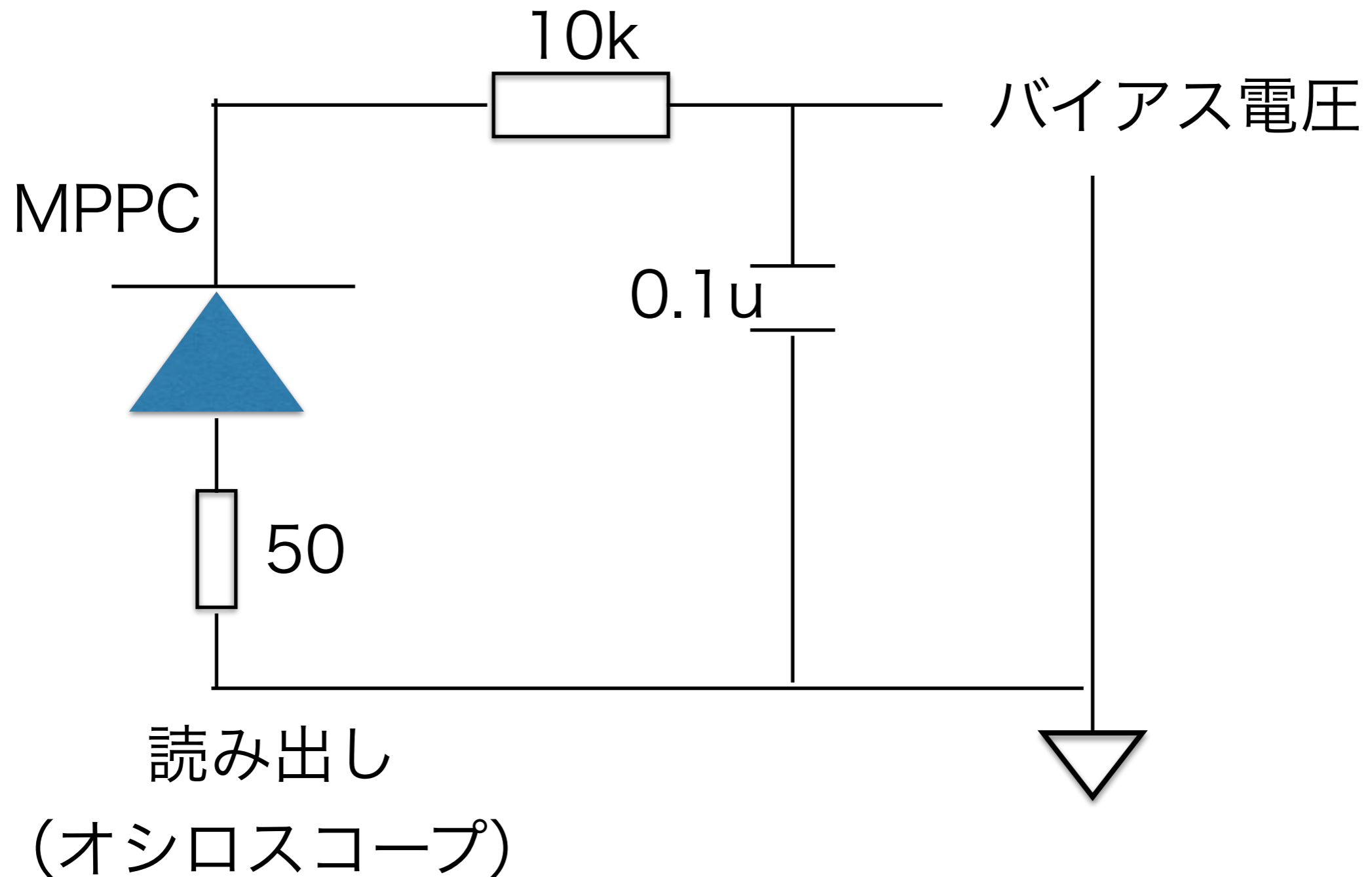








うまく動くかな？



イオン化(電子、イオン)

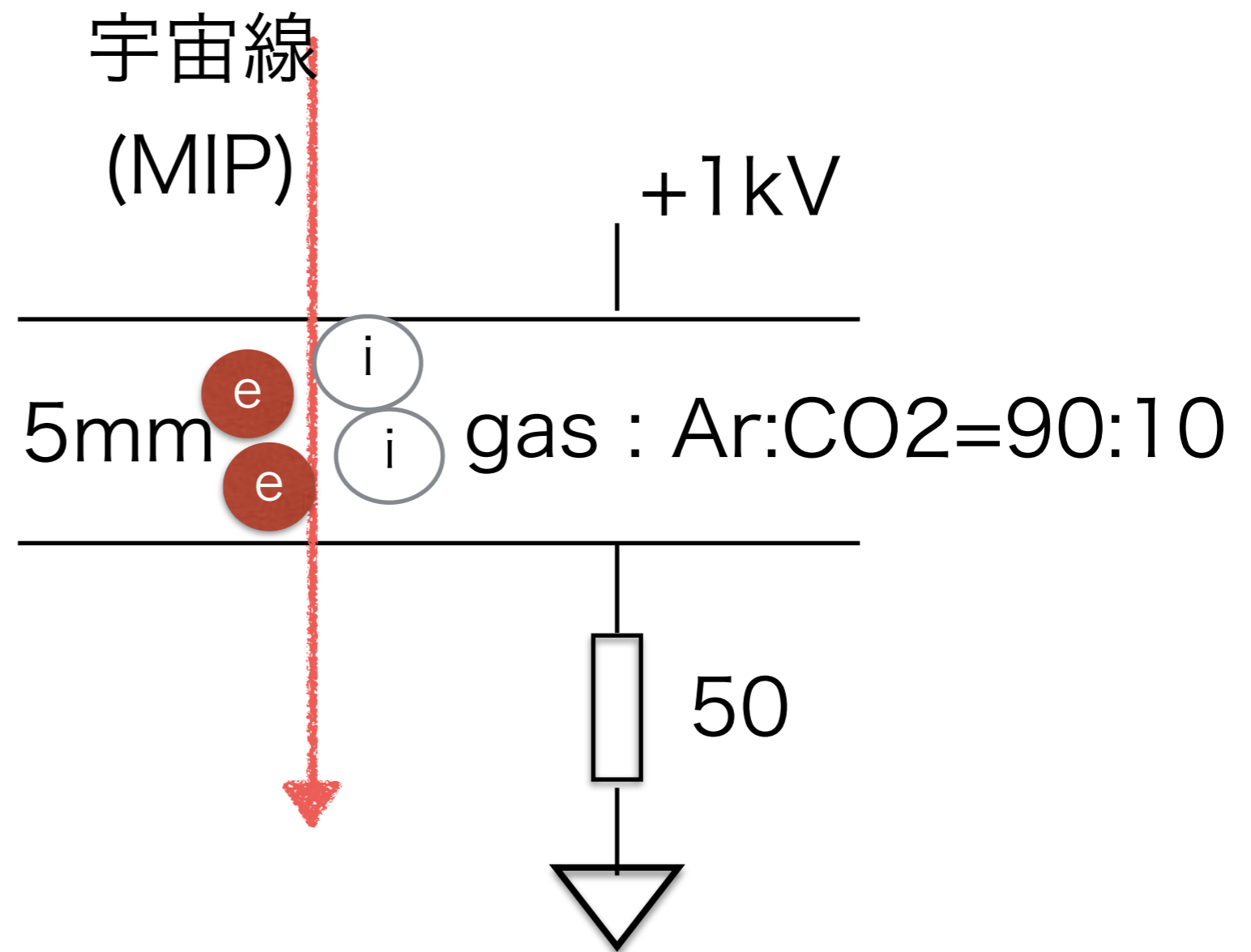
- ガス中に荷電粒子

- 励起とイオン化

- 電子、イオン

- Ar: 26eV

- CO2: 34eV



$$2(\text{MeV}/\text{cm}) \times 0.5(\text{cm}) \times 0.001 = 1(\text{keV})$$

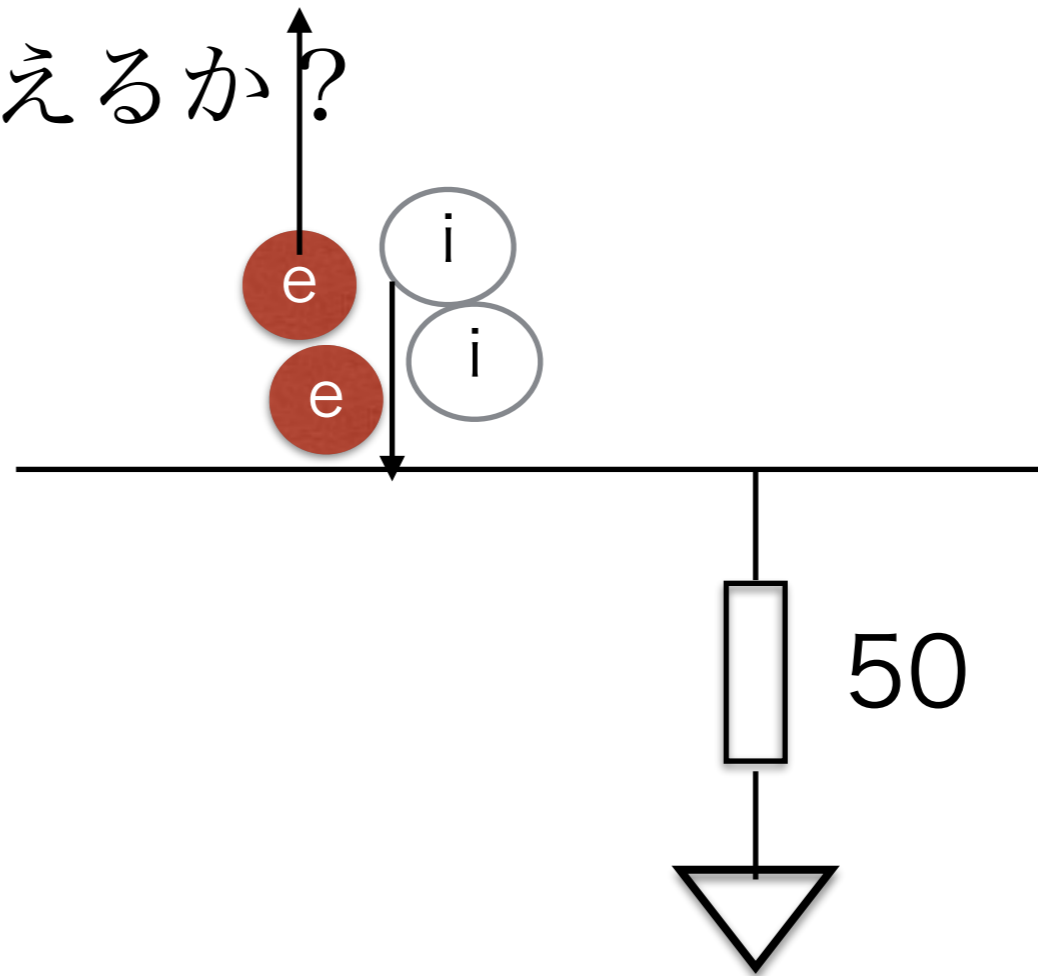
- 1keV / 30eV ~ 30 electron-ion pairs

イオン化(電子、イオン)

- ガス中を電場にひかれてドリフト

+1kV

- 30 e-i pairで信号はみえるか?

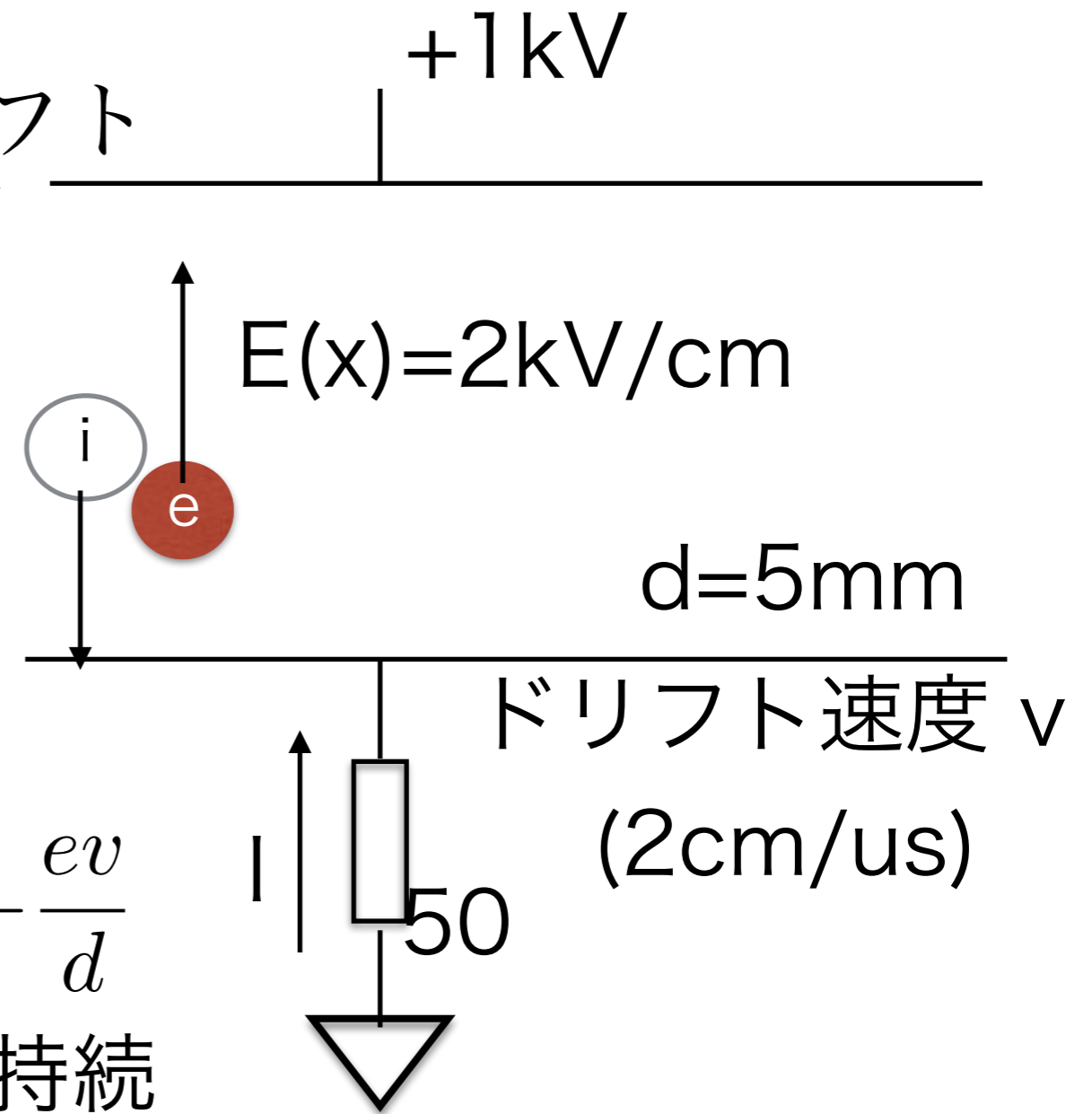


イオン化(電子、イオン)

- ガス中を電場にひかれてドリフト

- コンデンサーに蓄えた電荷

- 電場を維持



$$-eE \times dx = V dQ$$

$$I = dQ/dt = -eEv/V = -\frac{ev}{d}$$

$$=0.6\text{pA}, \text{ 最大}250\text{ns}\text{持続}$$

1個でこんなもの、
30個でも難しい

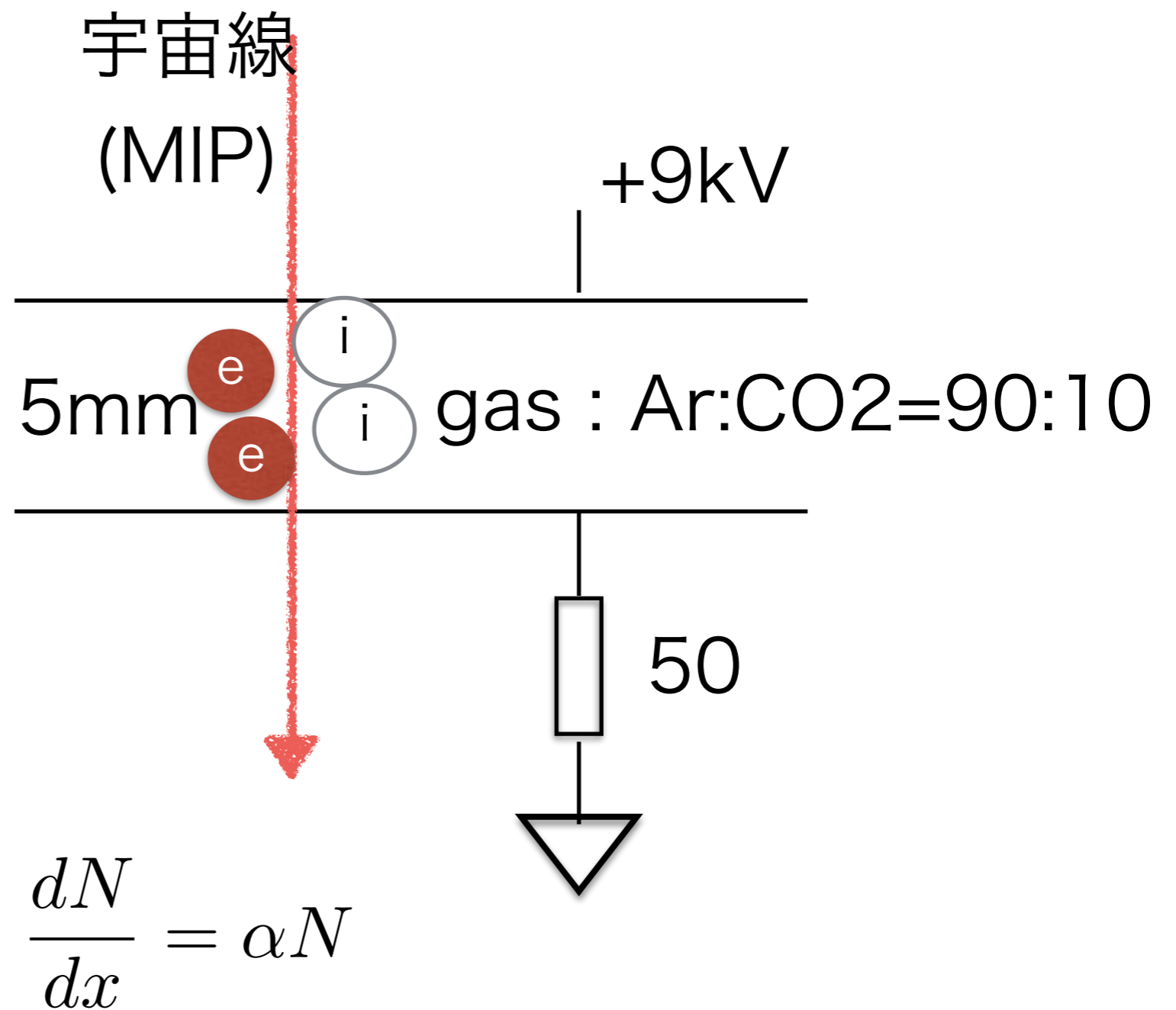
動く電荷が電流の源

誰が電荷を動かしている？

-> 検出器に蓄積されたエネルギー/HV電源

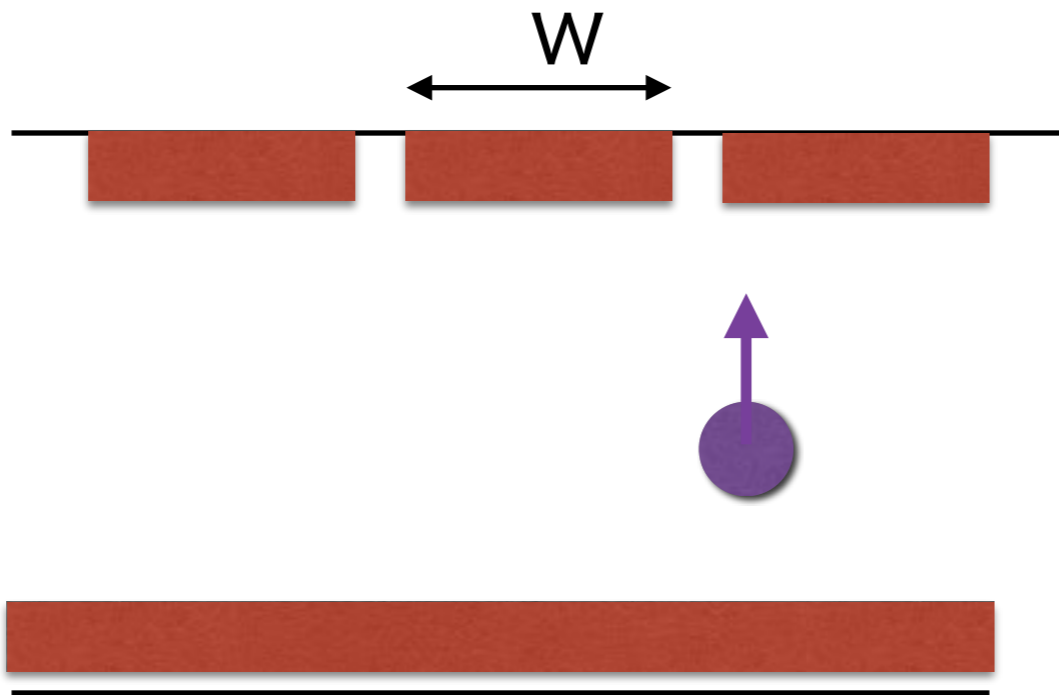
イオン化(電子、イオン)

- ガス中に荷電粒子
- 9kVのHV
- なたれによるガス増幅領域
- $\alpha = 26/\text{cm}$
- Gain = 0.4e6
- 30 e-i pair \rightarrow 2pC
- 簡単なプレアンプでみえるだろう。



位置の検出

- 移動する電子、イオンをみる電極配置

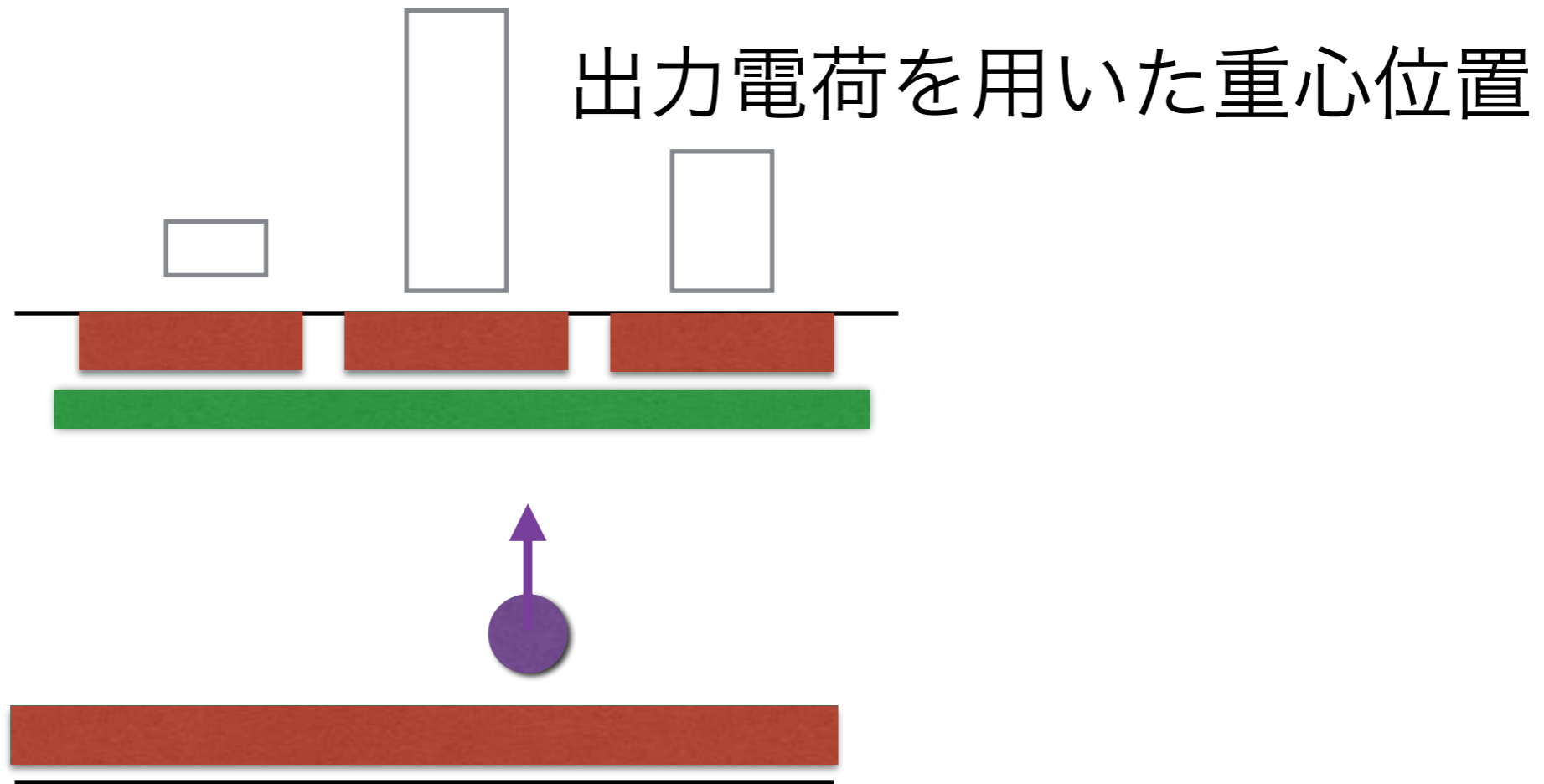


$$\text{RMS}^2 = \int_{-w/2}^{w/2} x^2 dx / w = \frac{1}{12} w^2$$

$$\text{RMS} = \frac{1}{\sqrt{12}} w$$

位置の検出

- 移動する電子、イオンをみる電極間の相関



位置の検出

- 伝搬時間の相関



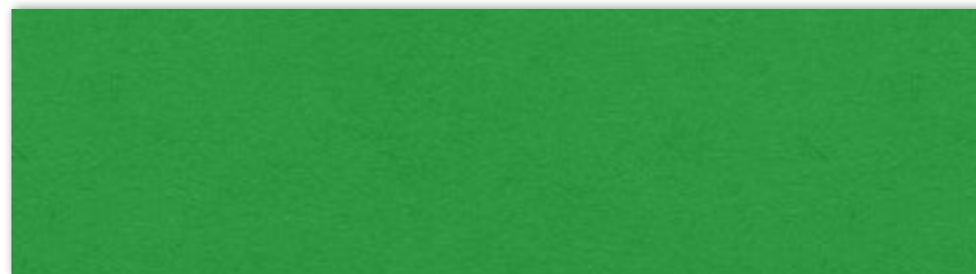
シンチレータ

時間差 : 位置情報
平均時間 : 粒子の通過時間

エネルギー = カロリメータ

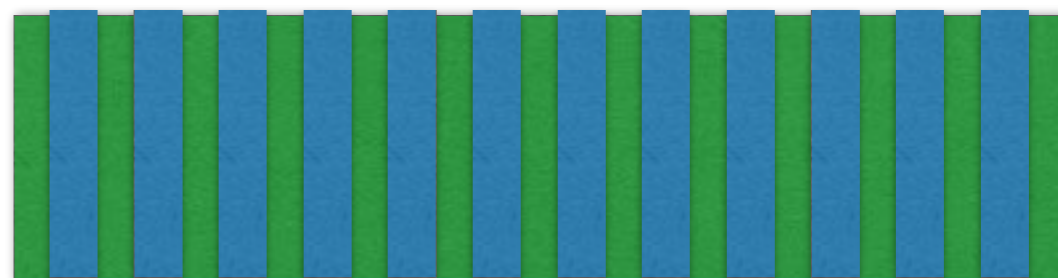
- 全吸収型

- PbWO₄
- CsI(Tl)
- undoped CsI
- 液体Kr
- 鉛ガラス



- サンプルング型

- 液体Ar/鉛
- プラスチックシンチ/鉛
- プラスチックシンチ/鉄
- プラスチックシンチ/真鍮



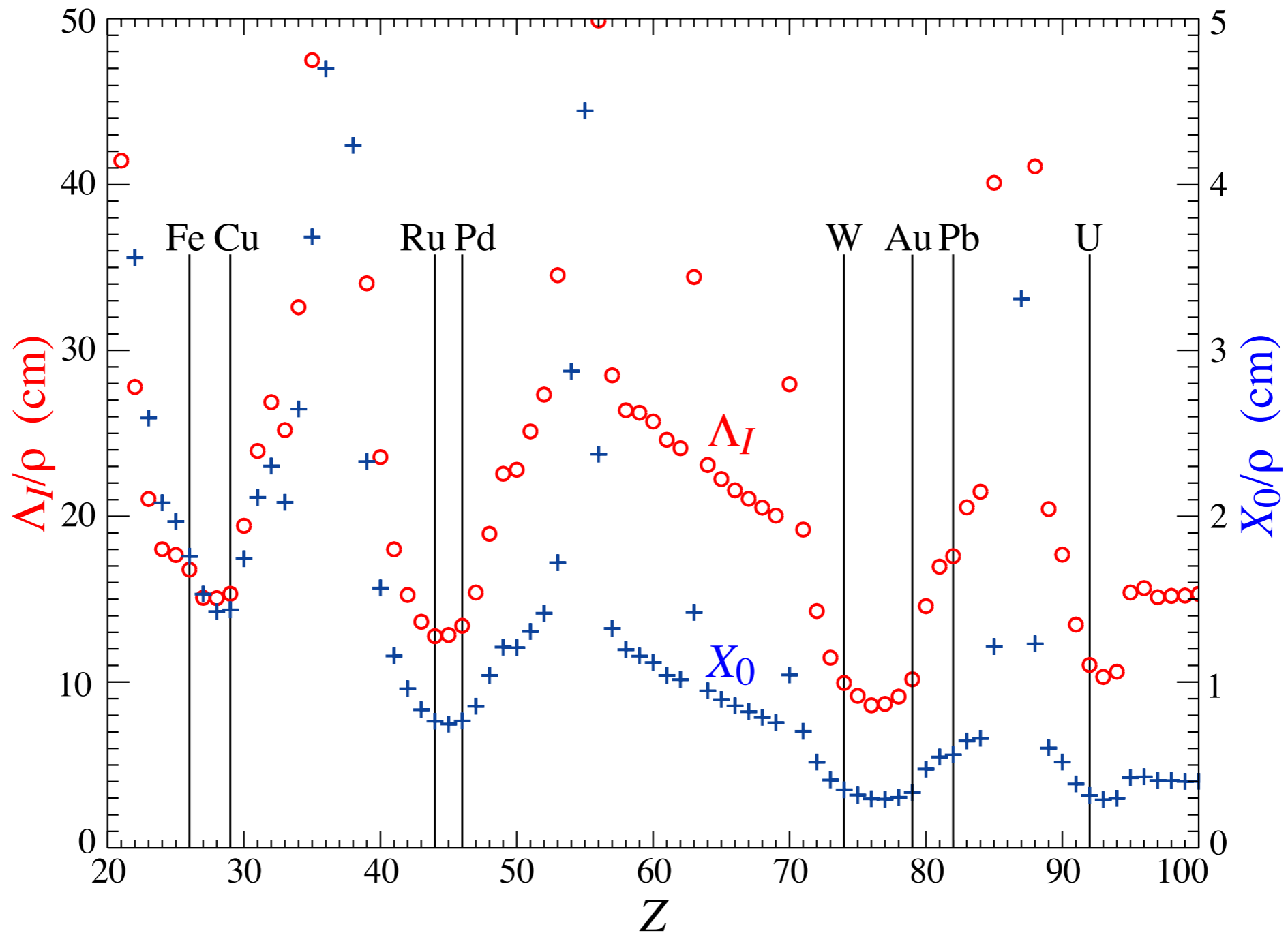


Figure 34.21: Nuclear interaction length λ_I/ρ (circles) and radiation length X_0/ρ (+’s) in cm for the chemical elements with $Z > 20$ and $\lambda_I < 50$ cm.

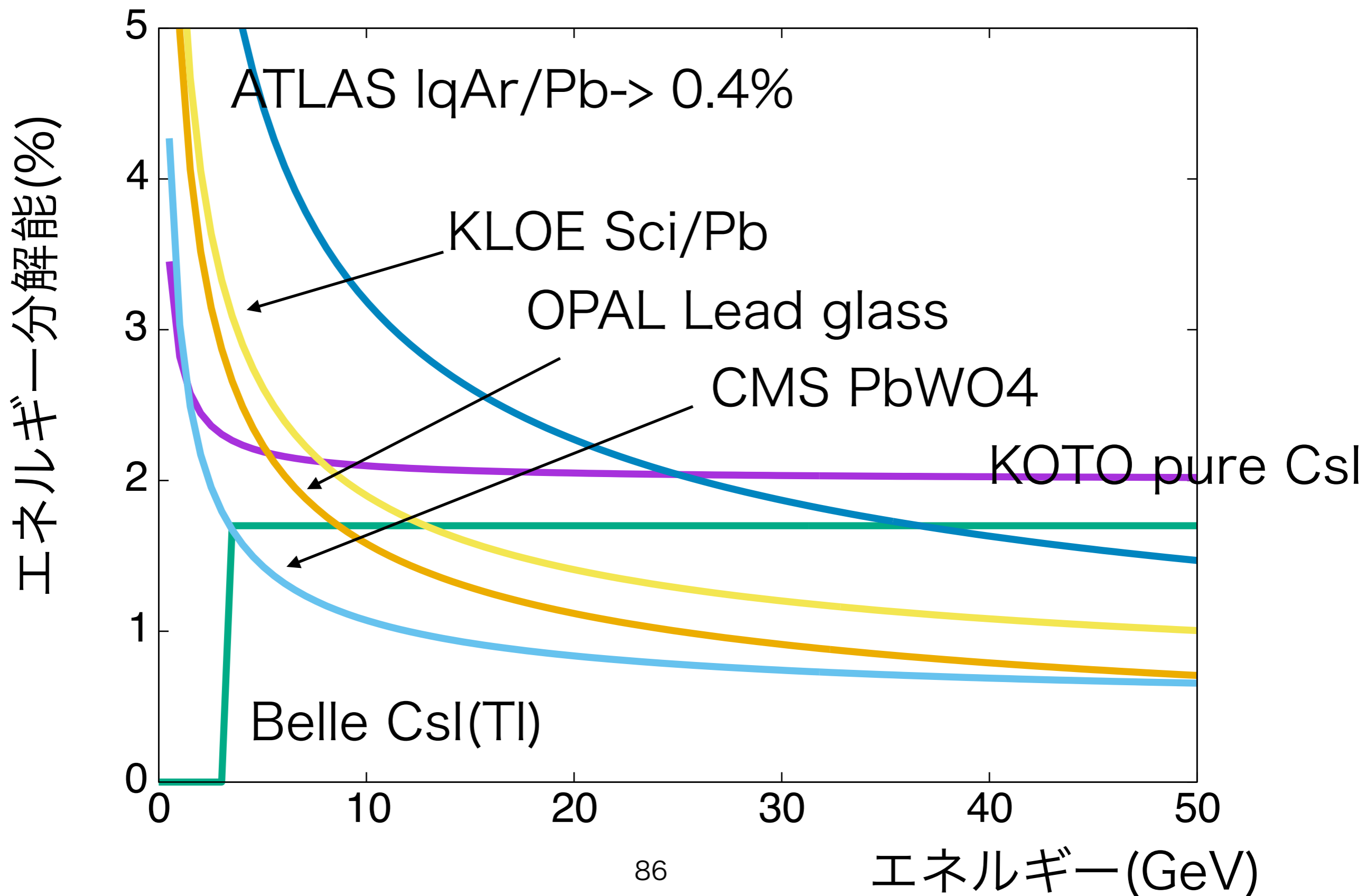
エネルギー分解能

- 統計項(Stochastic term)
 - $\Delta E \propto \sqrt{N}$
- Constant term
 - $\Delta E \propto E$: Calibration, non uniformity
- Noise term
 - ΔE : 一定

$$\Delta E / E (\%) = A / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus B \oplus C / E(\text{GeV})$$

	厚み (X0)	A	B	C
KOTO pure CsI	27	2	2	
Belle CsI(Tl)	16		1.7 (E>3.5GeV)	
CMS PbWO4	25	3	0.5	0.2
OPAL Lead glass	20.5	5		
KLOE Lead/Sci.	15	5.7	0.6	
ATLAS Liq.Ar/Pb	25	10	0.4	0.3

電磁カロリメータ



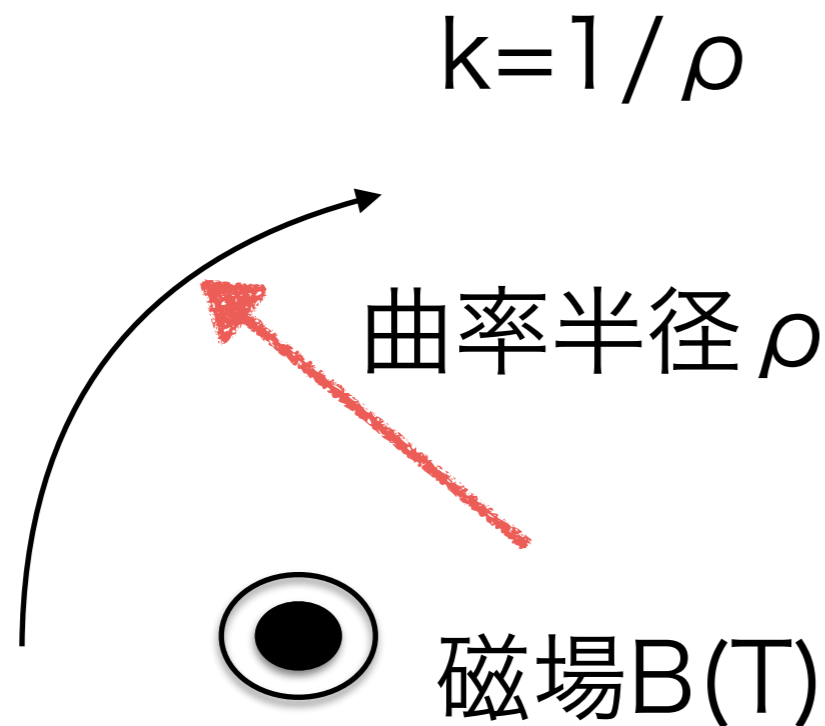
運動量

- 磁場中の飛跡 -> 曲がり具合

- 磁場

$$P(\text{GeV}) = 0.3 B(\text{T}) \rho(\text{m})$$

- 位置測定



$$1/p = 1/(0.3B)k$$

$$\Delta p/p \propto \Delta k \times p$$

Δk

測定位置精度 $1/\sqrt{N}$

多重散乱 $1/p \sqrt{(X/X_0)}$

組み合わせ

- 飛跡検出+磁場
 - 低物質質量、強磁場
- 電磁カロリメータ
 - 飛跡とのマッチング -> 電子/ γ 線
- ハドロンカロリメータ
- ミューオン検出器
 - 貫通力が高い粒子

最後に

- 物理のイメージや疑問を大切に。
- 実験を作り、動かし、解析。