

チェレンコフ放射 (Cherenkov radiation)

電離 (ionization)

蛍光 (scintillation)

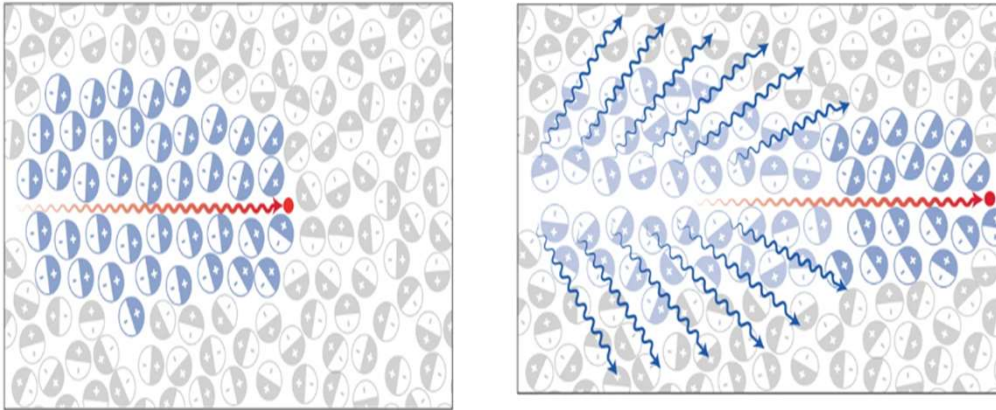
チェレンコフ放射 (Cherenkov radiation)

チェレンコフ放射

- Cherenkov radiation

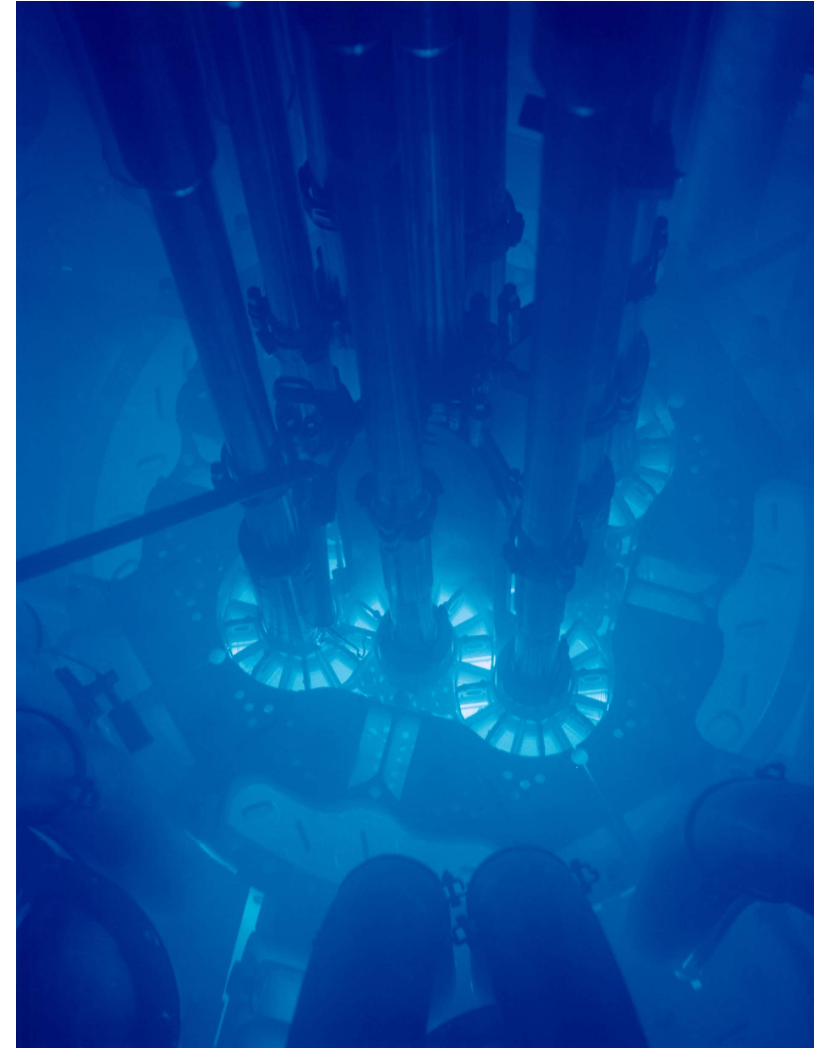
荷電粒子が**媒質中**の光速(c/n)
を超える速度で運動するときに
放出される青い光
(n :媒質の屈折率)

a



Nature Nanotechnology (*Nat. Nanotechnol.*)
ISSN 1748-3395 (online) ISSN 1748-3387 (print)

荷電粒子が媒質中を通過→媒質を分極させる
その分極が元に戻るときに青い光を放出



From Wikipedia

原子炉からのチェレンコフ光

宇宙線研究所のチェレンコフ光を利用した実験

水チェレンコフ



<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>

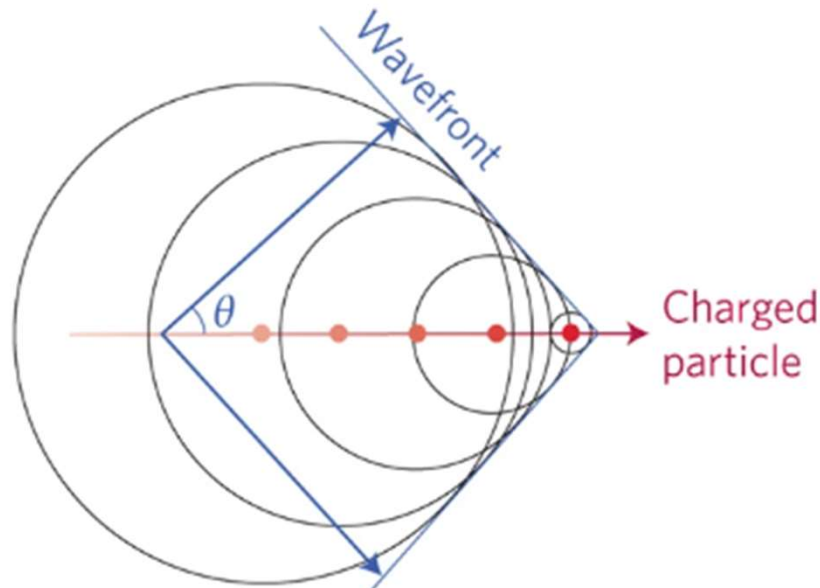
大気チェレンコフ



https://www.cta-observatory.org/wp-content/uploads/2018/10/CTA_Japanese.pdf

チェレンコフ光の放出角

- 荷電粒子が $v > \frac{c}{n}$ で運動する間、周囲の媒質からチェレンコフ光が放出され続ける
- 光の波面が重なり、音波の場合の「衝撃波」に似た構造ができる

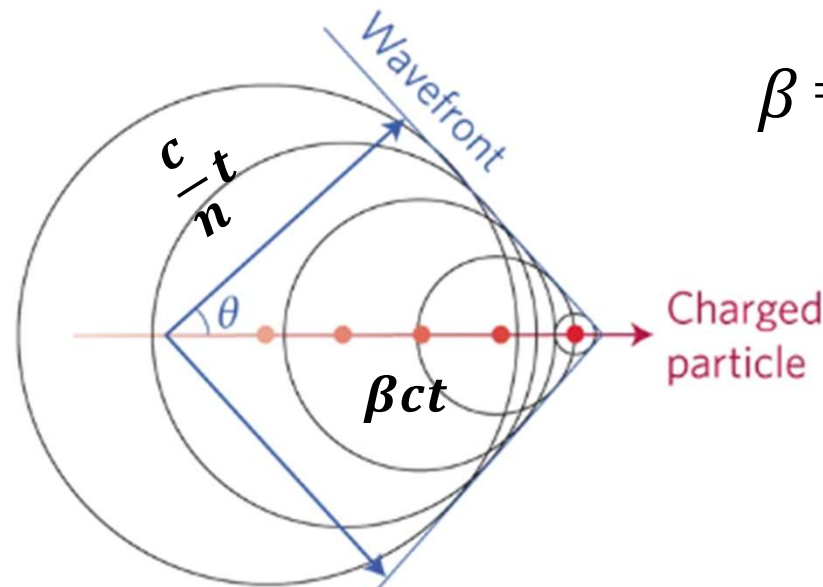


Nature Nanotechnology (Nat. Nanotechnol.)
ISSN 1748-3395 (online) ISSN 1748-3387 (print)



チェレンコフ光の放出角

- 荷電粒子が $v > \frac{c}{n}$ で運動する間、周囲の媒質からチェレンコフ光が放出され続ける
- 光の波面が重なり、音波の場合の「衝撃波」に似た構造ができる



Nature Nanotechnology (Nat. Nanotechnol.)
ISSN 1748-3395 (online) ISSN 1748-3387 (print)

$$\beta = \frac{v}{c}$$

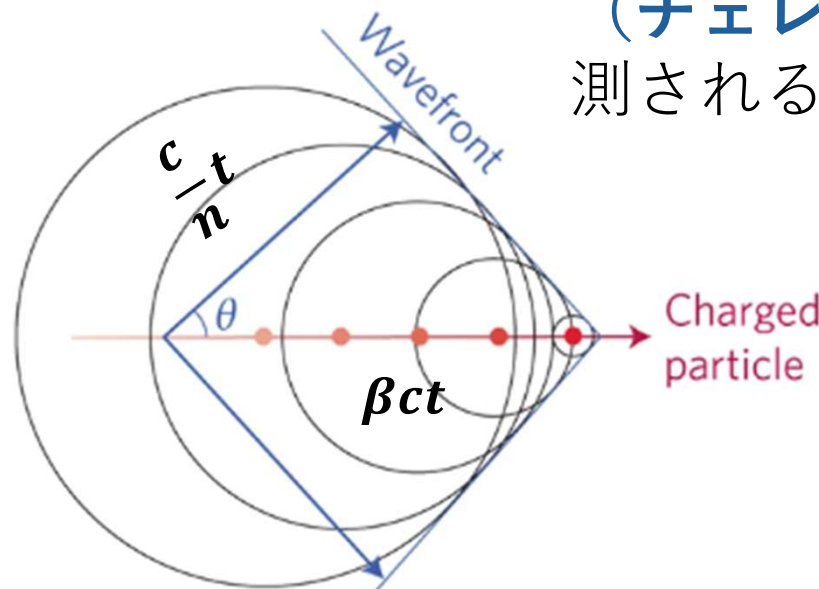


$$\cos \theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta}$$

チェレンコフ光の放出角

- 荷電粒子が $v > \frac{c}{n}$ で運動する間周囲の媒質からチェレンコフ光が放出され続ける
- 波面が重なり、音波の場合の「衝撃波」に似た構造ができる

粒子の進行方向に対して一定の角度
(**チェレンコフ角度**) を持った放射として観測される



Nature Nanotechnology (Nat. Nanotechnol.)
ISSN 1748-3395 (online) ISSN 1748-3387 (print)



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

チェレンコフ放射: **Frank-Tamm**の式

単位長さ・単位周波数あたりに放出される
チェレンコフ光のエネルギー

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} = \frac{q^2}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right)$$

q : 荷電粒子の電荷

通過した荷電粒子の**電荷量**を見分けるのに有用

例：電荷 $q = 1$ (陽子) と電荷 $q = 2$ (例：ヘリウム原子核)
の場合、放出されるエネルギー量は 2倍...ではなく
 $2 \times 2 = 4$ 倍違う → 見分けやすい

チェレンコフ放射: **Frank-Tamm**の式

単位長さ・単位周波数あたりに放出される
チェレンコフ光のエネルギー

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} = \frac{q^2}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right)$$

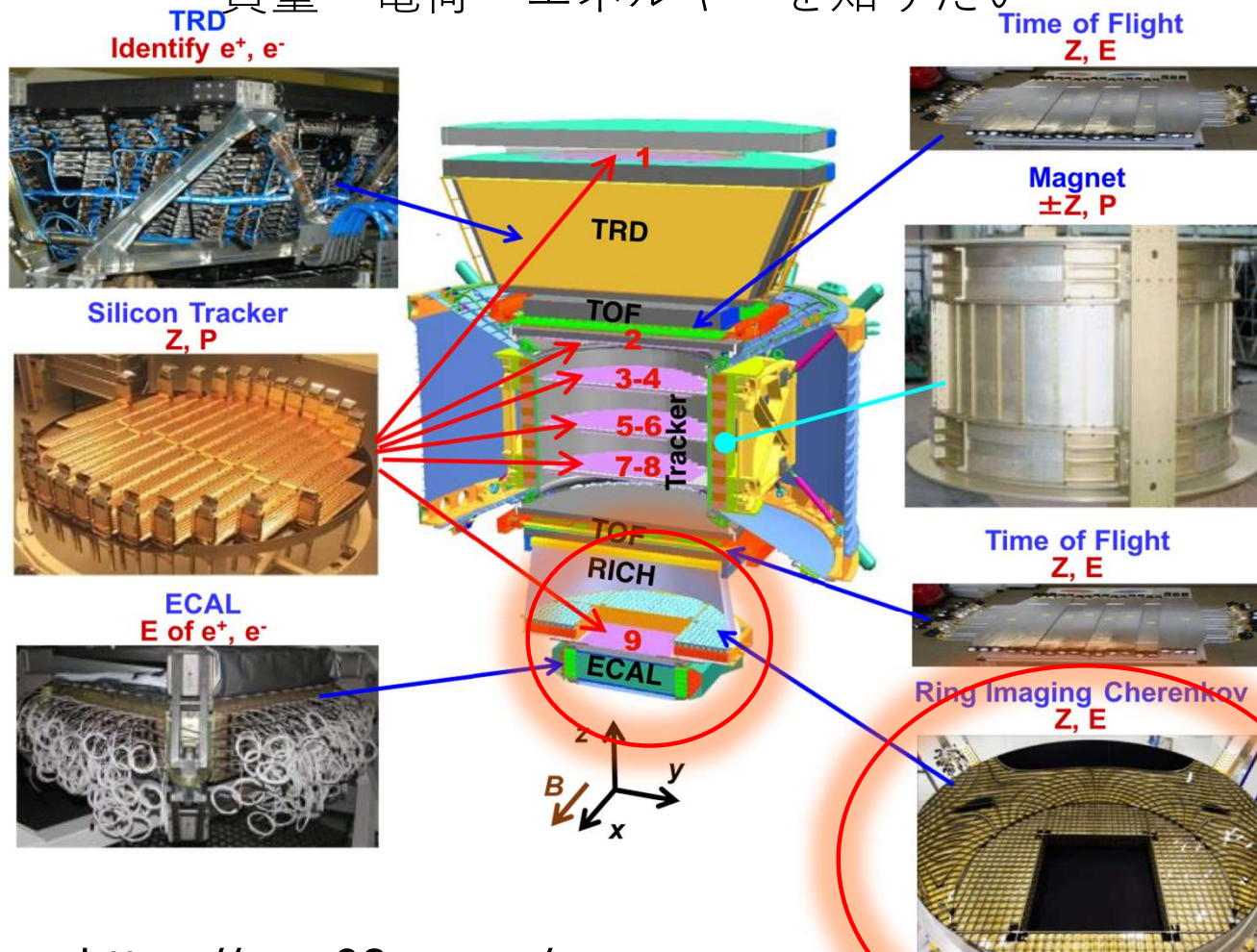
この式には粒子の質量 m が入らない

粒子の質量に寄らず（独立に）、
粒子の**速度** v を測定する場合にも役に立つ

チェレンコフ発光を利用した粒子測定器の例

• RICH (Ring Imaging CHerenkov) 検出器

質量・電荷・エネルギーを知りたい



“AMS-02”の例

アルファ磁気分光器
様々な粒子で構成される
宇宙線を種類ごとに分類して
エネルギースペクトル測定

<https://ams02.space/>

チェレンコフ光はなぜ青く見える？

- Frank-Tammの式を単位“波長”あたりの“光子数”に書き直してみる

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} = \frac{q^2}{4\pi} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right) \quad \left[\frac{J}{m s^{-1}} \right]$$

$$E = Nh\nu = Nhc/\lambda$$

$$\omega = 2\pi c/\lambda$$

E : エネルギー

N : 光子の総数

$h\nu$: 一つの光子の持つエネルギー

ν : 周波数

λ : 波長

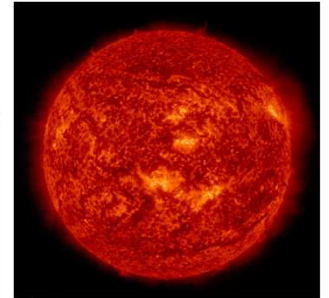
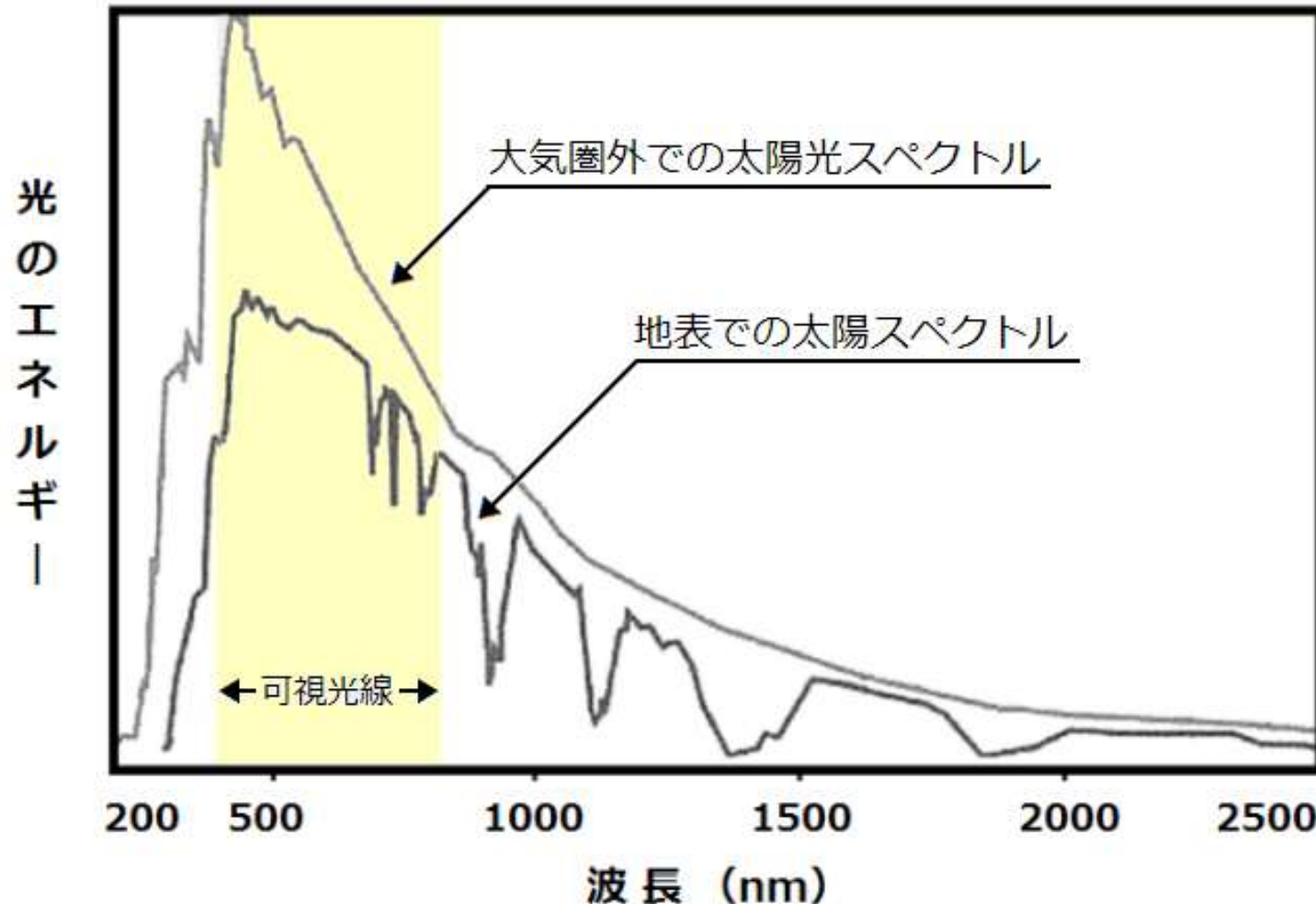
$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{\pi c}{h} e^2 \mu(\lambda) \frac{1}{\lambda^2} \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\lambda)} \right)$$

波長のマイナス2乗 (短い方が多い)

単位波長あたりの光子数・エネルギー： スペクトル

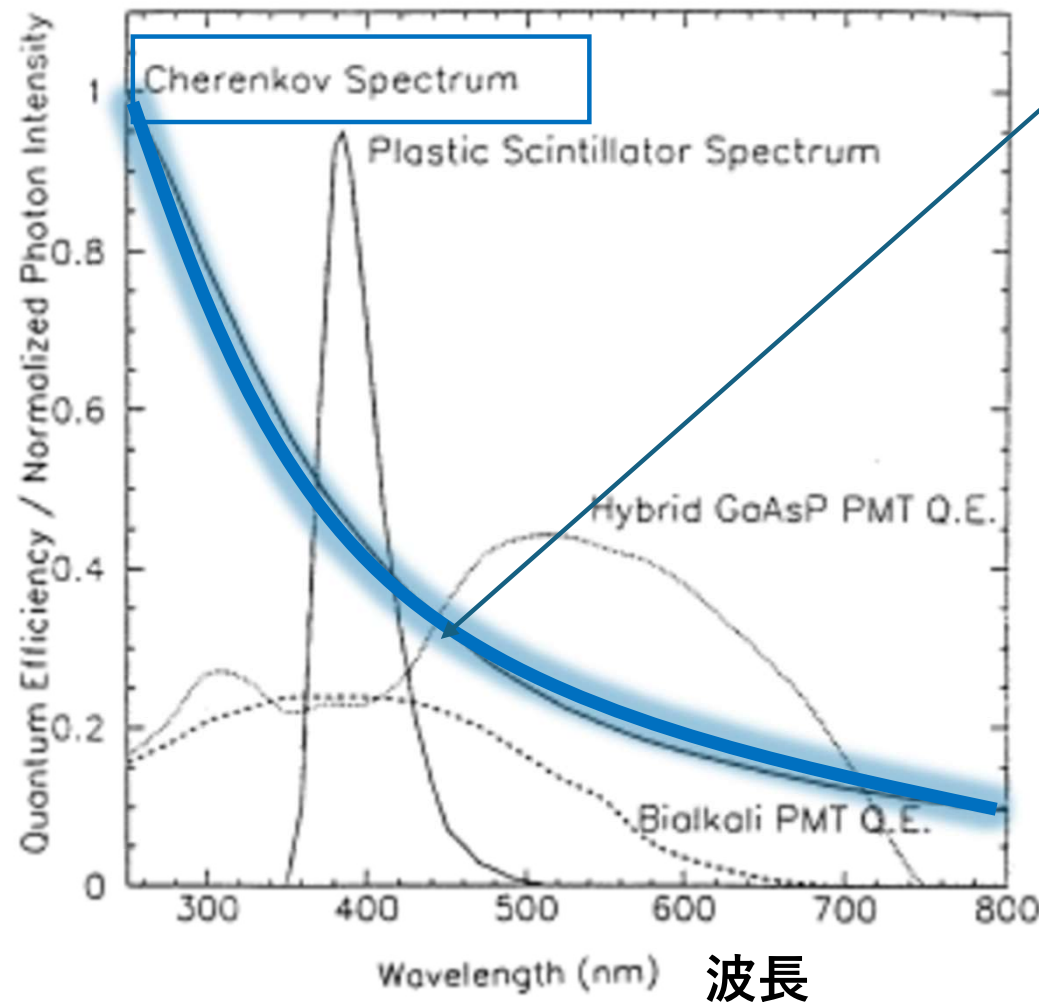
例：太陽光スペクトル

光のエネルギーが掛かったもの
光数にエネルギーが掛かったもの



<https://optica.cocolog-nifty.com/blog/2012/08/post-efe1.html>

単位波長あたりの光子数：スペクトル



短い波長側で
多く光子が放出
されるので
青く見える

https://www.stsci.edu/stsci/meetings/space_detectors/leopold1.htm

様々な媒質とその屈折率・チェレンコフ角

チェレンコフ角と発光エネルギー閾値を計算してみよう

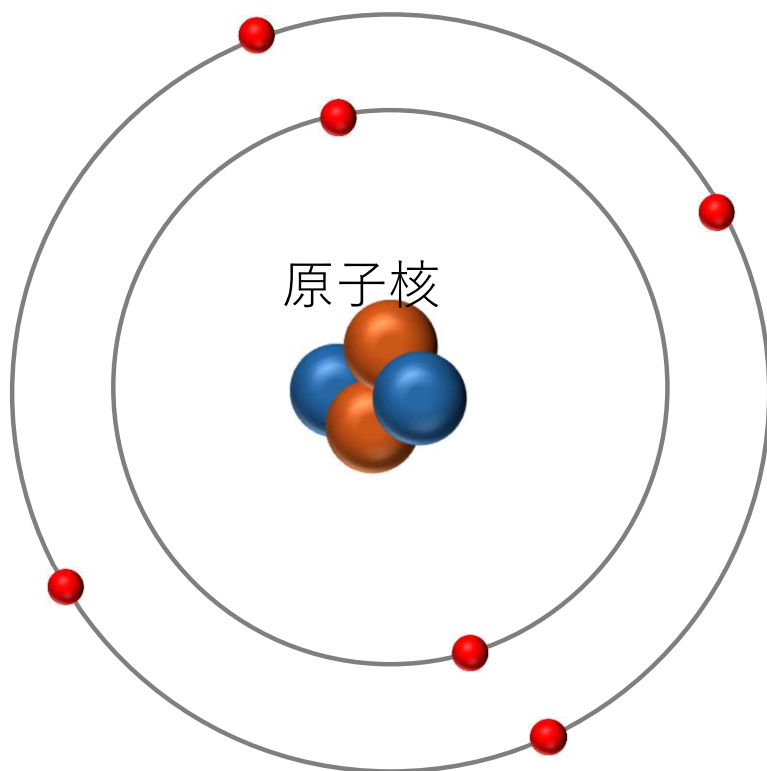
$$\cos \theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta}$$

- 地球大気屈折率は....1.0003
- 水の屈折率は.....1.333
- アクリルの屈折率は.....1.49
- これらの物質に対し、十分相対論的な粒子($\beta = 1$)のチェレンコフ角を計算してみよう
- 逆に、これらの媒質に対してチェレンコフ光を放出するために必要な β の値を求めてみよう。
- 上記の β の値をエネルギーに換算すると
$$E = \gamma mc^2 = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
となる。 $mc^2 = 106 \text{ MeV}$ のミュー粒子の場合、発光に必要なエネルギーはいくつか。

電離 (ionization)

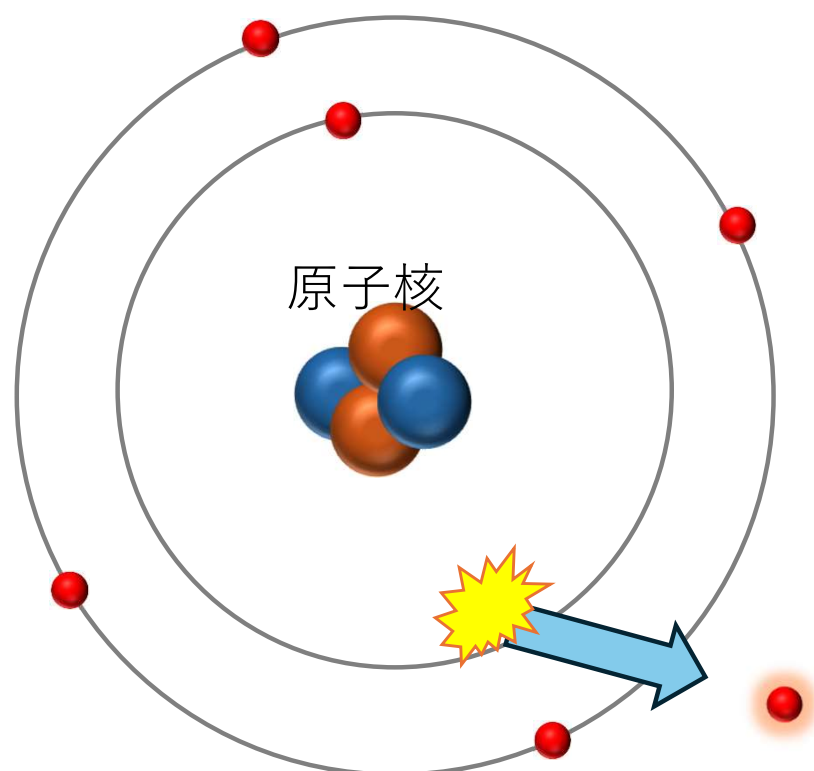
電離 (ionization、イオン化)

電氣的に“中性”な状態の原子



イオン化のエネルギーを供給するのは
荷電粒子・熱・光
など様々だが、今回は荷電粒子を考える

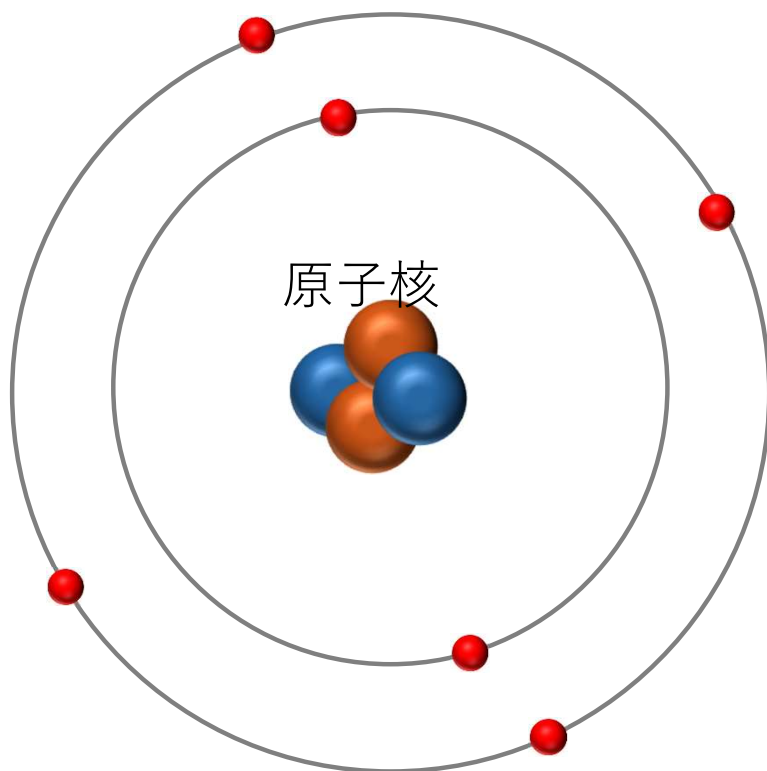
全体としてはプラスの電荷を帯びる
電離 (イオン化)



外部からのエネルギー供給により軌道電子が飛び出す

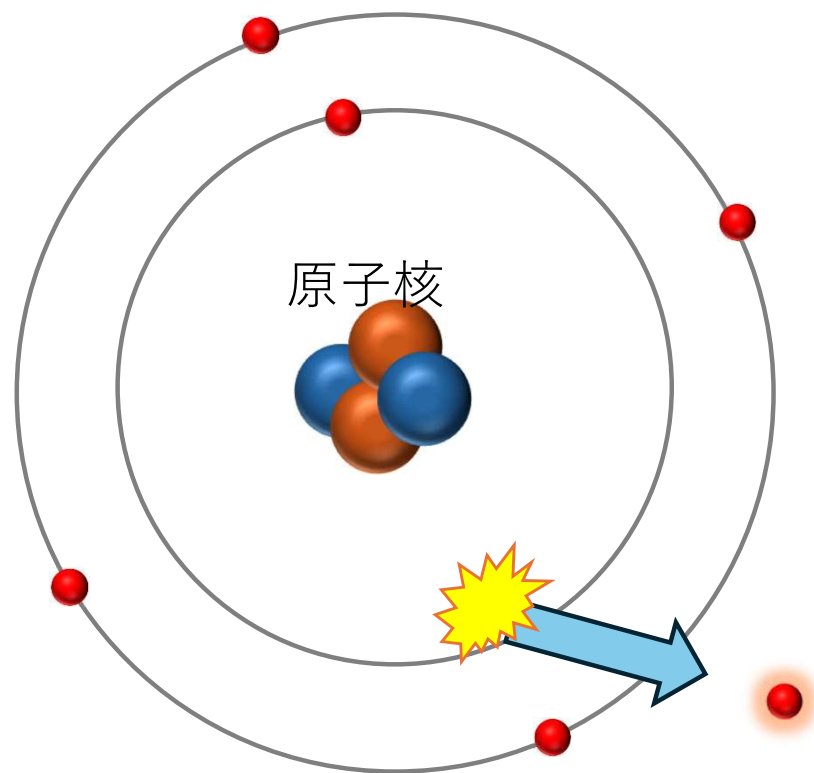
電離 (ionization、イオン化)

電氣的に“中性”な状態の原子



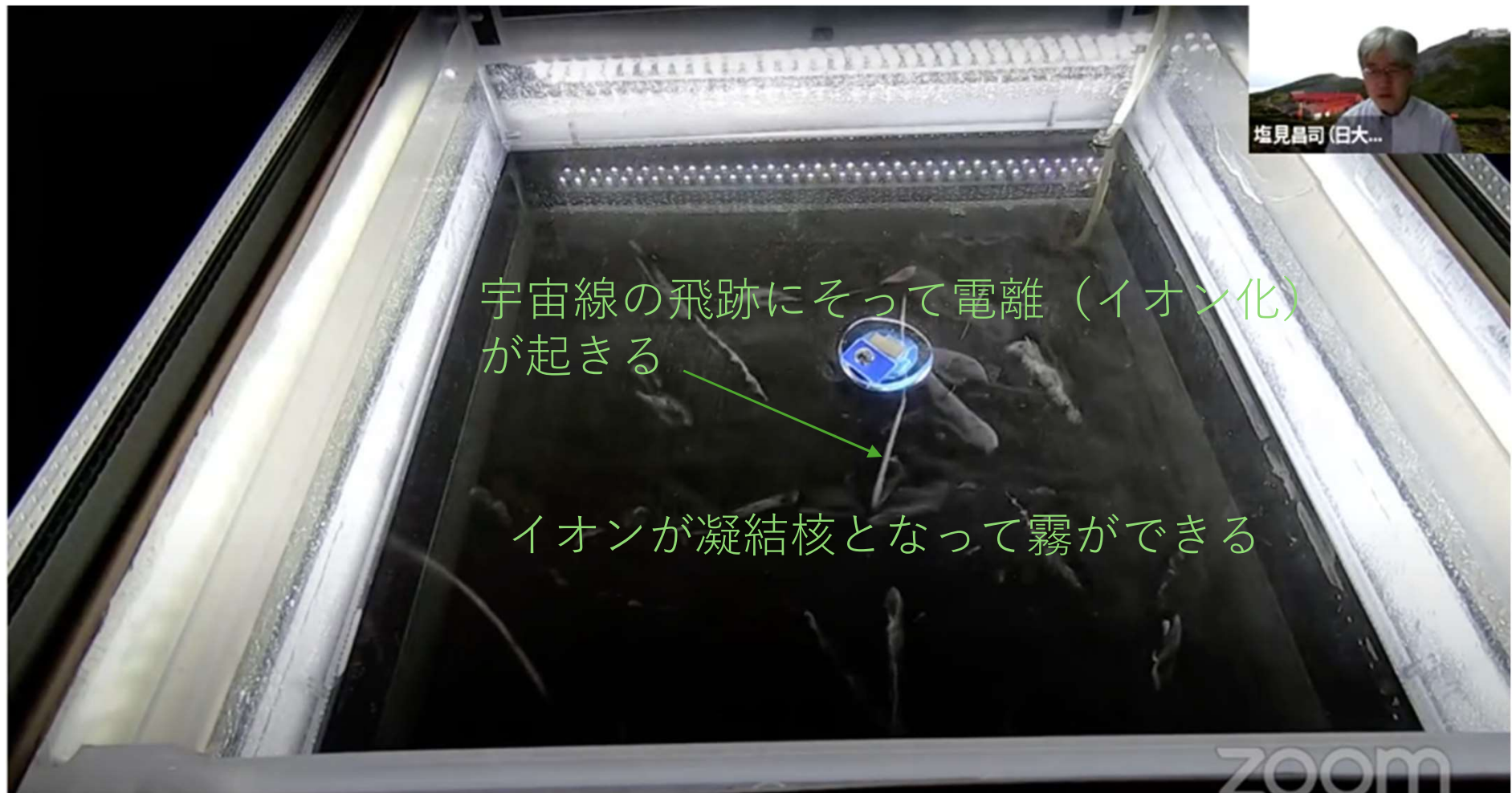
イオン化のエネルギーを供給するのは
荷電粒子・熱・光
など様々だが、今回は荷電粒子を考える

外部からのエネルギー供給により軌道電子が飛び出す



全体としてはプラスの電荷を帯びる
電離 (イオン化)

電離を利用した荷電粒子の観測： 霧箱(**cloud chamber**)



Bethe-Blochの式:電離損失

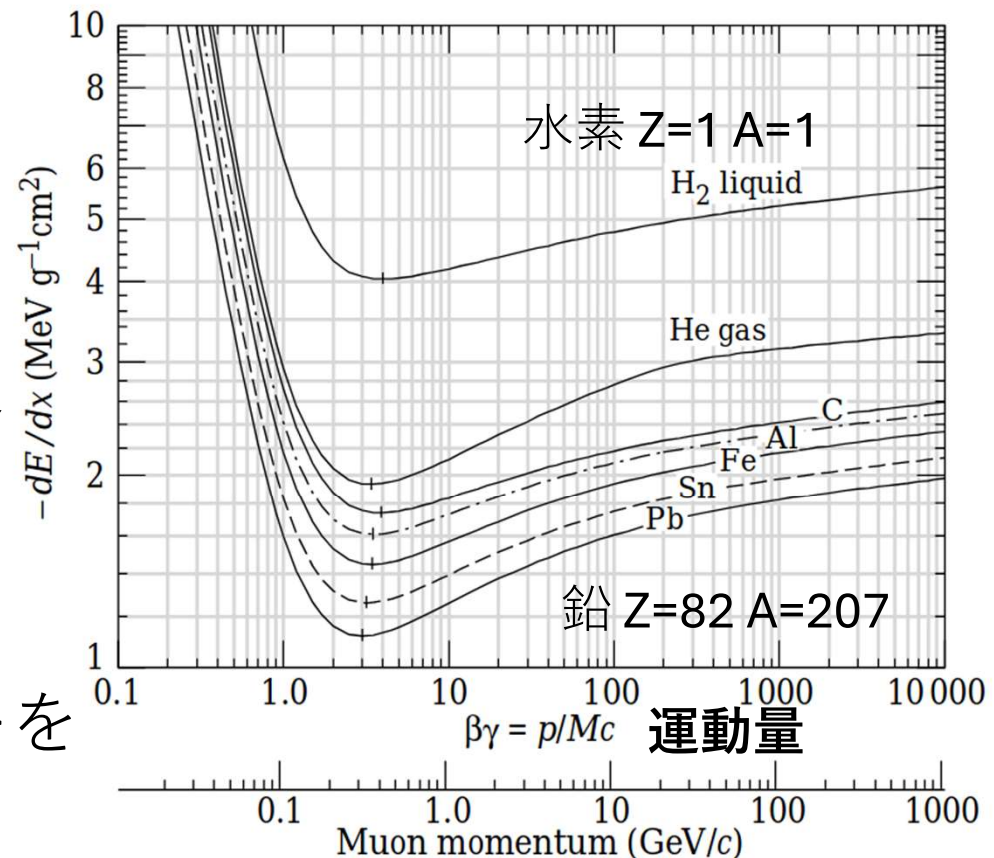
荷電粒子が電離によって単位物質厚みあたりに失うエネルギーの式

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

$$n = \frac{N_A \cdot Z \cdot \rho}{A \cdot M_u}$$

- 軽い元素の媒質の方が電離によるエネルギー損失は大きい
- 運動量の小さい
(エネルギーが低い)
粒子の方が電離でエネルギーを失いやすい

柏サイエン



蛍光 (scintillation)

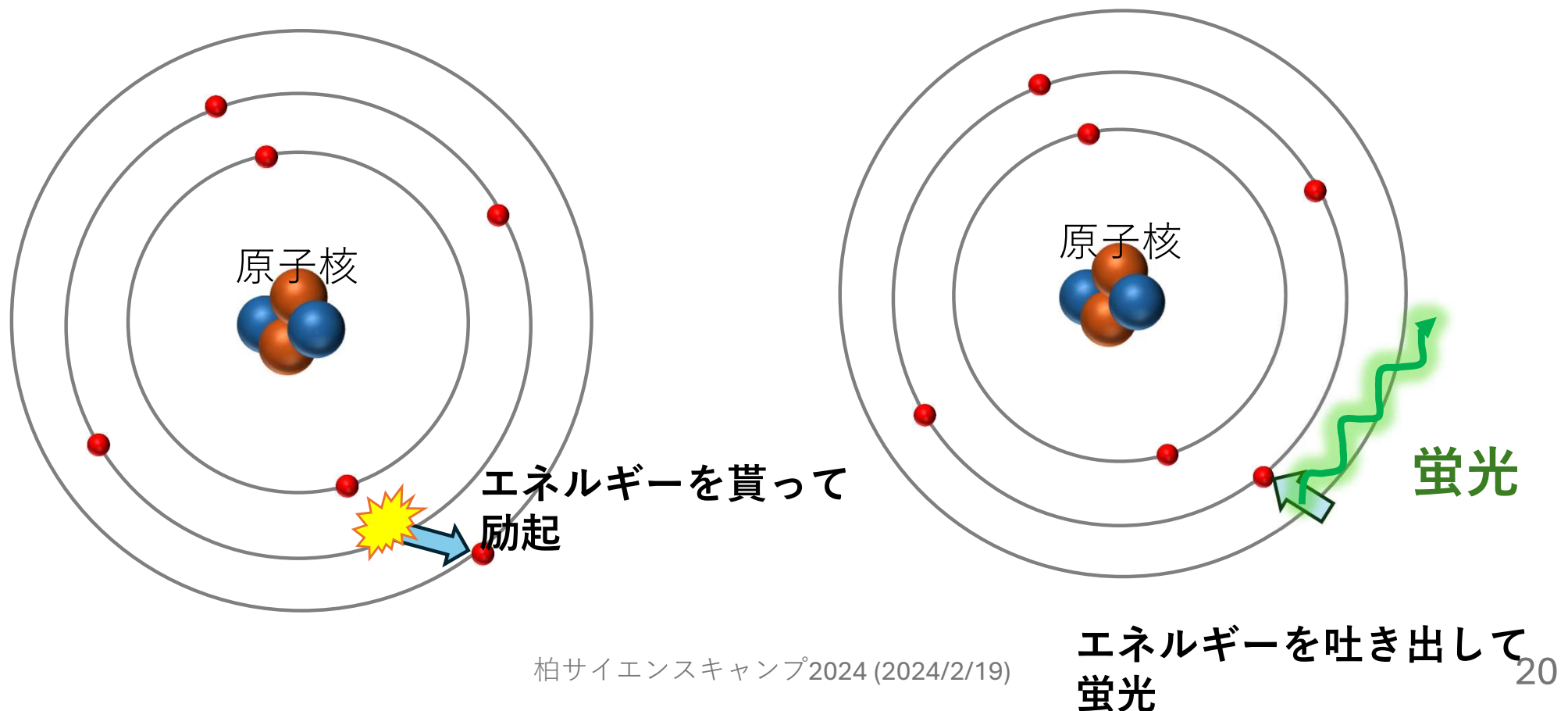
蛍光(Scintillation)

簡単のために
原子を例に描いていますが
実際は分子構造の準位で
もっと複雑です

外部からのエネルギー供給

→ 電子が**励起**される（別準位へ移動）

電子が得たエネルギーが可視光帯の光で“再放出”→**蛍光**



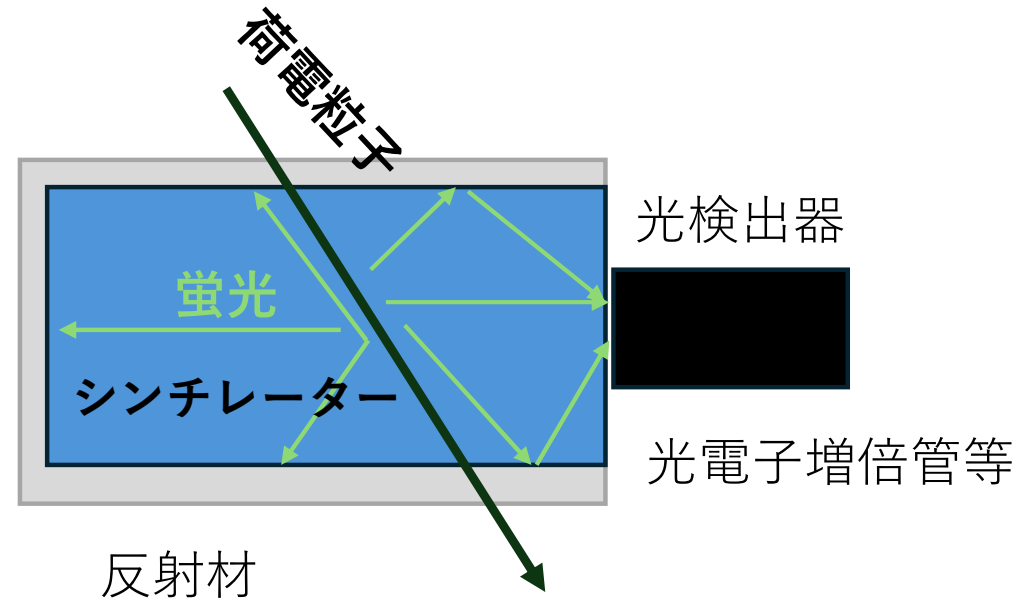
蛍光現象を利用した荷電粒子測定

蛍光現象：シンチレーション

蛍光物質：シンチレーター



<https://oaktree-lab.shop-pro.jp/?pid=102382326>



物質中の蛍光を検出することで
間接的に荷電粒子が通過したことを
検知

素粒子実験では非常によく使われる
蛍光はチェレンコフ光とは異なり
等方的に放出される

様々なシンチレータ素材

「シンチレータの原理と応用例」 飯田崇史 より転載

- ・ 有機、無機、固体、液体など様々な種類がある。

プラスチック
シンチレータ

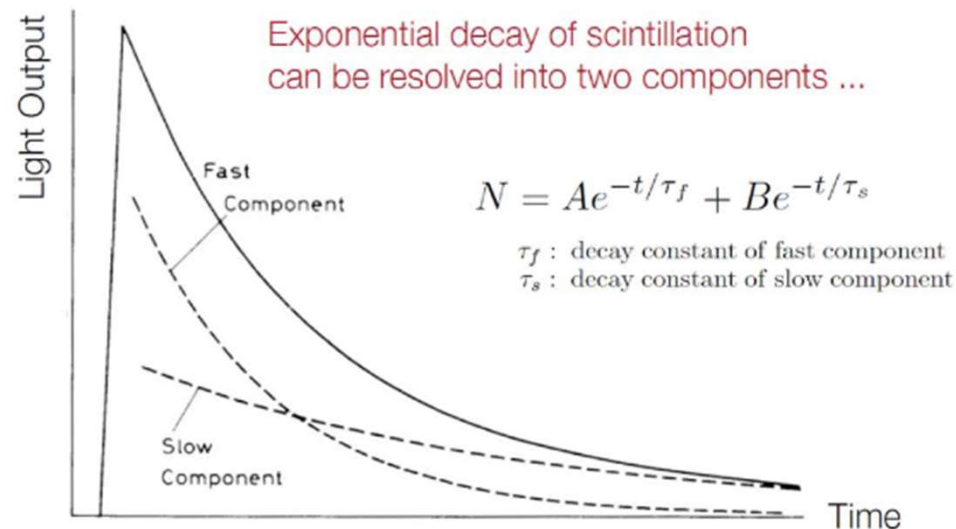
無機		有機	
明るい！！		早い！！(ナノ秒)	
固体	液体	固体	液体
NaI(Tl)、BGOなど	液体Xe, 液体Arなど	プラシン、有機結晶	液シン
原子番号が大きく、密度も高い。 ただし遅い(μ 秒)。 ガンマ線、エックス線の検出向き。	有機同様、分子レベルの反応なので応答速度も速い。 値段が高く、扱いづらい。	安い、軽い。 加工性に優れる。 早いので高計数率の測定向き。 ミュオン検出等。	安い、軽い。 大規模実験がしやすい。 純化可能。 危険物である。

シンチレータ発光の時間特性

- チェレンコフ光(~ns)と比較すると励起されてから基底状態に落ちるまでの時間は長く、**蛍光の方がゆっくりと放出される**ことが知られている

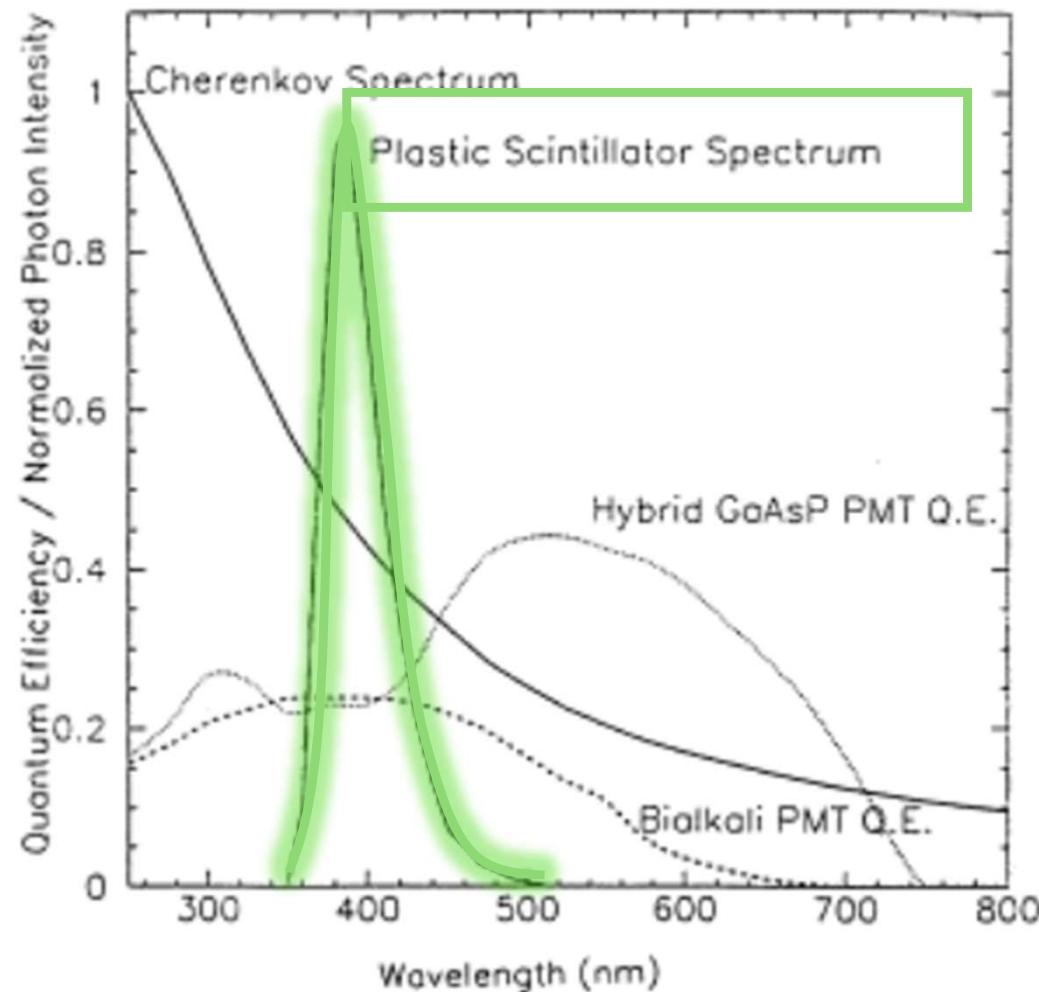
指数関数的な減衰（2成分）でよく特徴づけられる

$$N = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$$



実際の応答時間の長さは
使用するシンチレータの種類
による
齋藤先生に聞いてみよう

プラスチックシンチレータからの 蛍光の波長域



比較的広い範囲に連続的な分布を持つ**チェレンコフ光**と異なり

プラスチックシンチレータからの蛍光は、電子の軌道順位のエネルギー差に対応するので、比較的狭い範囲に**ピーク構造**を持つ

(詳細な波長分布はシンチレータの種類、素材によって異なる)

蛍光現象を使った宇宙線研究所のプロジェクト（地球大気）

