



Principle of Radiation Measurement

放射線の 測定原理

放射線の測定方法

- 物質との相互作用で生じたシグナルをとらえる
- 種々の相互作用
 - 荷電粒子
 - 物質中の電子との電離損失
 - 制動放射
 - シンクロトン放射
 - チェレンコフ放射
 - knock-on 電子 (δ 線)
 - 電子より重い荷電粒子によって電子が弾き飛ばされる
 - γ , X線
 - 光電効果
 - レイリー散乱・コンプトン散乱
 - 電子・陽電子対生成
 - 中性子
 - 原子核との相互作用の結果、陽子や γ 線が放出
 - 陽子、 γ 線と物質の相互作用から間接的に測定



Interaction of charged particles with materials

荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子と物質の相互作用

- 荷電粒子と物質の相互作用
 - 複数のプロセスがある
 - どの効果が一番聞かかはエネルギー(運動量)依存性がある

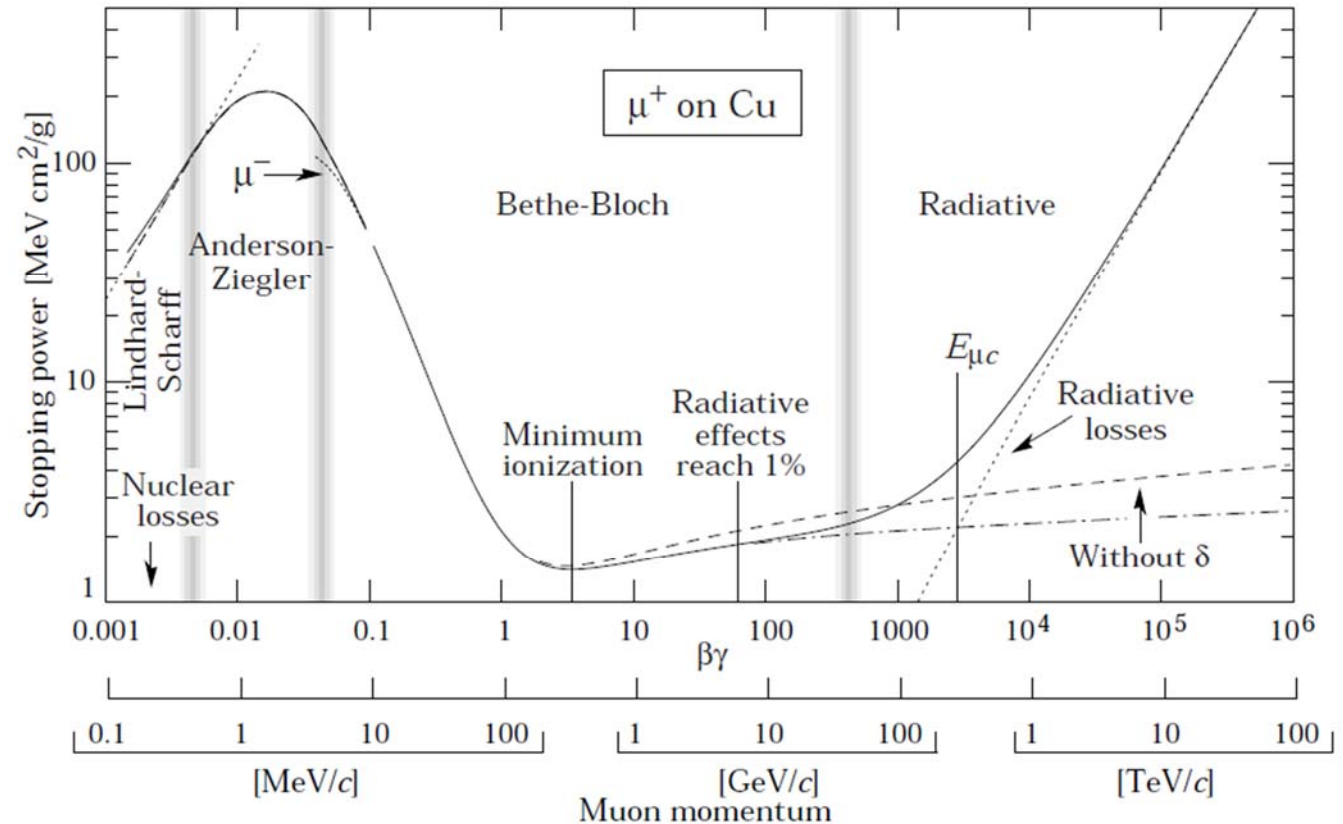


Fig. 27.1: Stopping power ($= \langle -dE/dx \rangle$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [2], and data at higher energies are from Ref. 1. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ μ^- ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [3].

Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

電離損失

- 荷電粒子が物質中を通過するとき、電子を電離させることにより少しずつそのエネルギーを失っていく
 - Bethe-Bloch の式

$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Here T_{\max} is the maximum kinetic energy which can be imparted to a free electron in a single collision, and the other variables are defined in Table 27.1. With K as defined in Table 27.1 and A in g mol^{-1} , the units are $\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$.

Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

電離損失

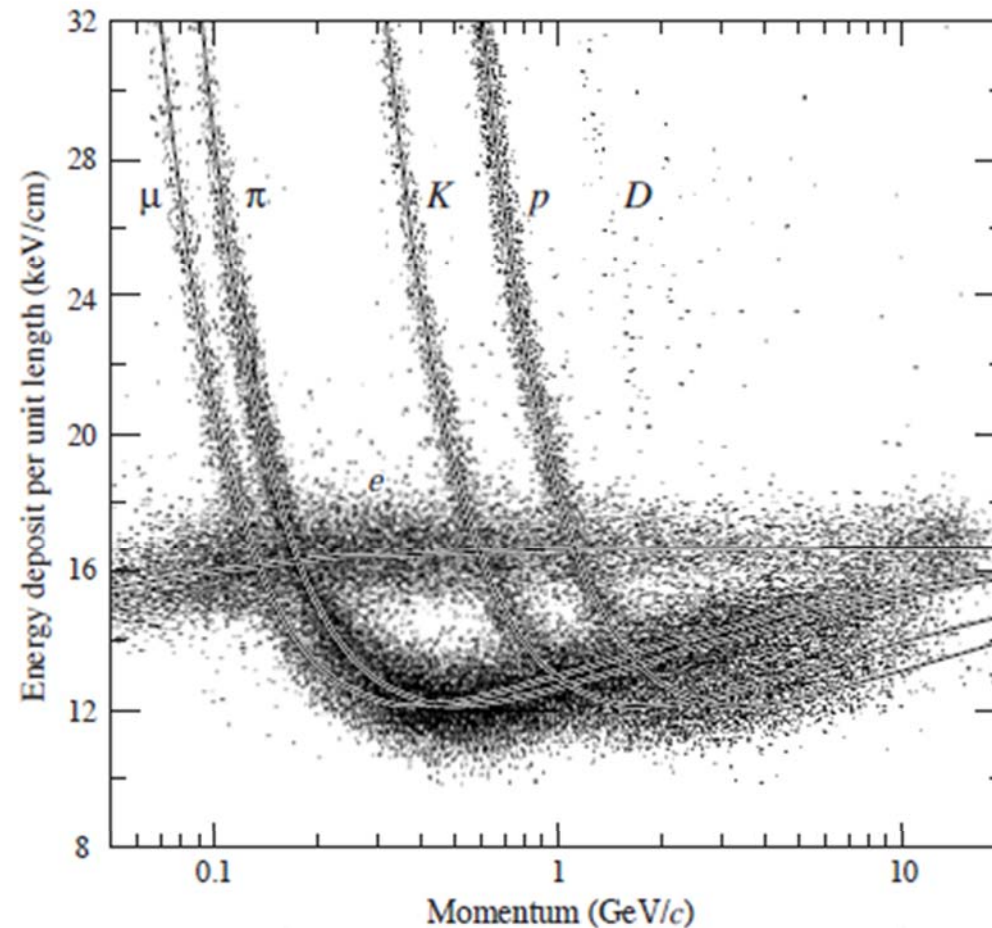
Table 27.1: Summary of variables used in this section. The kinematic variables β and γ have their usual meanings.

Symbol	Definition	Units or Value
α	Fine structure constant ($e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$)	1/137.035 999 11(46)
M	Incident particle mass	MeV/ c^2
E	Incident part. energy $\gamma M c^2$	MeV
T	Kinetic energy	MeV
$m_e c^2$	Electron mass $\times c^2$	0.510 998 918(44) MeV
r_e	Classical electron radius $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 325(28) fm
N_A	Avogadro's number	$6.022 1415(10) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ze	Charge of incident particle	
Z	Atomic number of absorber	
A	Atomic mass of absorber	g mol^{-1}
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	$0.307 075 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
I	Mean excitation energy	eV (<i>Nota bene!</i>)
$\delta(\beta\gamma)$	Density effect correction to ionization energy loss	
$\hbar\omega_p$	Plasma energy $(\sqrt{4\pi N_e r_e^3} m_e c^2 / \alpha)$	$28.816 \sqrt{\rho(Z/A)} \text{ eV}^{(a)}$
N_e	Electron density	(units of r_e) $^{-3}$
w_j	Weight fraction of the j th element in a compound or mixture	
n_j	\propto number of j th kind of atoms in a compound or mixture	
—	$4\alpha r_e^2 N_A / A$	$(716.408 \text{ g cm}^{-2})^{-1}$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
X_0	Radiation length	g cm^{-2}
E_c	Critical energy for electrons	MeV
$E_{\mu c}$	Critical energy for muons	GeV
E_s	Scale energy $\sqrt{4\pi/\alpha} m_e c^2$	21.2052 MeV
R_M	Molière radius	g cm^{-2}

Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

電離損失

- 放射線の持つ電荷の二乗に比例
- 真空中の光速 c で規格化された速さ β の関数
 - 質量が異なるとグラフが左右にずれる

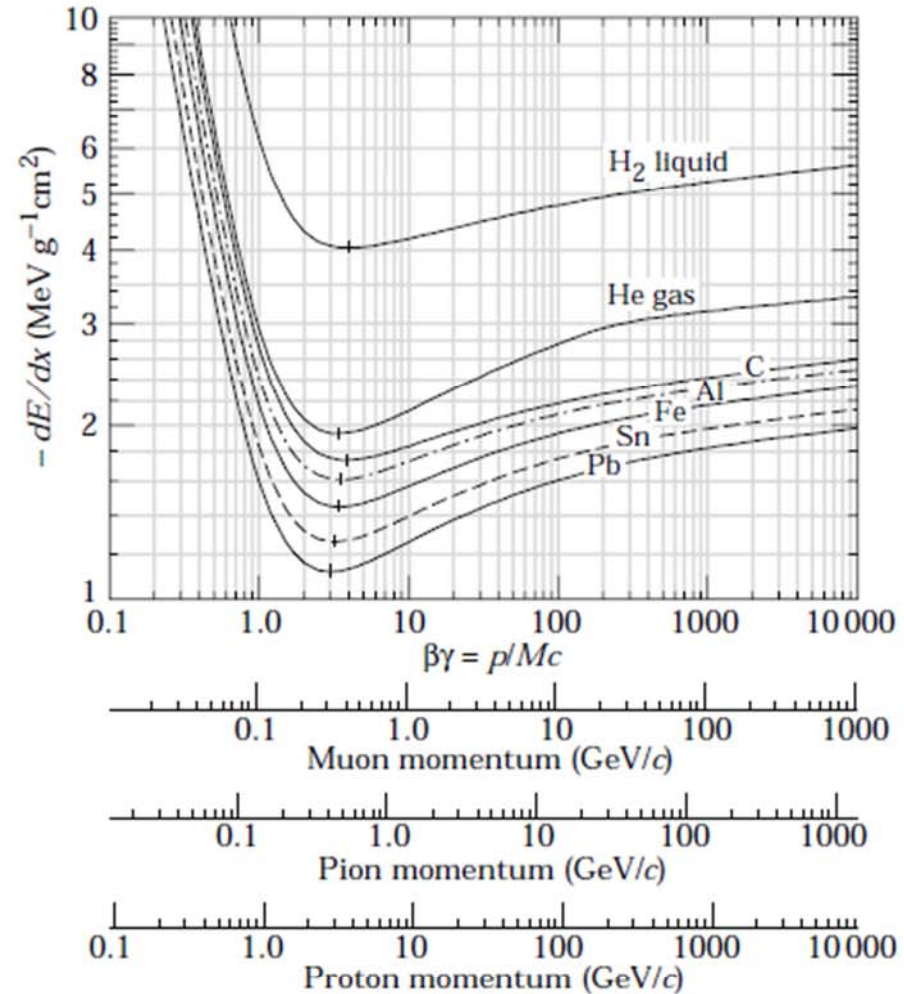


Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

Figure 28.15: The PEP4/9-TPC energy deposit measurements (185 samples, 8.5 atm Ar-CH₄ 80:20). The ionization rate at the Fermi plateau (at high β) is 1.4 times that for the minimum at lower β . This ratio increases to 1.6 at atmospheric pressure.

電離損失

- 質量数の大きな物質ほど、単位厚み[g/cm²]あたりに落とすエネルギーが少ない
 - Z/A に比例



Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

Figure 27.3: Mean energy loss rate in liquid (bubble chamber) hydrogen, gaseous helium, carbon, aluminum, iron, tin, and lead. Radiative effects, relevant for muons and pions, are not included. These become significant for muons in iron for $\beta\gamma \gtrsim 1000$, and at lower momenta for muons in higher- Z absorbers. See Fig. 27.21.

補足：厚みの単位 [g/cm²]

- 放射線の相互作用の確率

- 物質中を通過するまでに幾つの原子核や電子があるかに依存
- 通常の長さの単位を使用した場合
 - 同じ厚みでも温度によって原子核・電子の数が異なる
- 長さ×密度 を使用
 - 温度変化を気にしなくてよい
 - 例
 - アルミ 10 mm 厚: $1.0 \text{ [cm]} \times 2.7 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 2.7 \text{ [g/cm}^2\text{]}$
 - 鉛 10 mm 厚: $1.0 \text{ [cm]} \times 11.4 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 11.4 \text{ [g/cm}^2\text{]}$

電離損失

- 物質が十分厚いと放射線は物質中で止まる
 - ある入射エネルギーに対し、放射線が止まる(=エネルギーが0になる)ために必要な厚み(=飛程, Range)が計算出来る

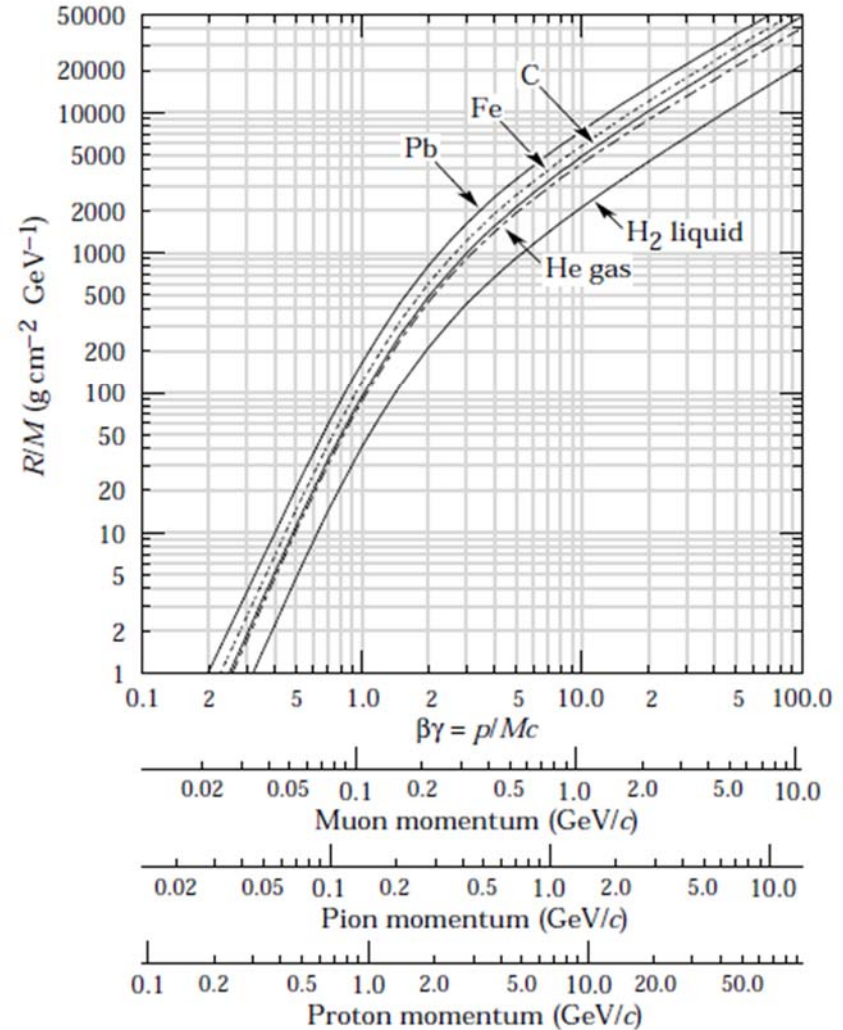
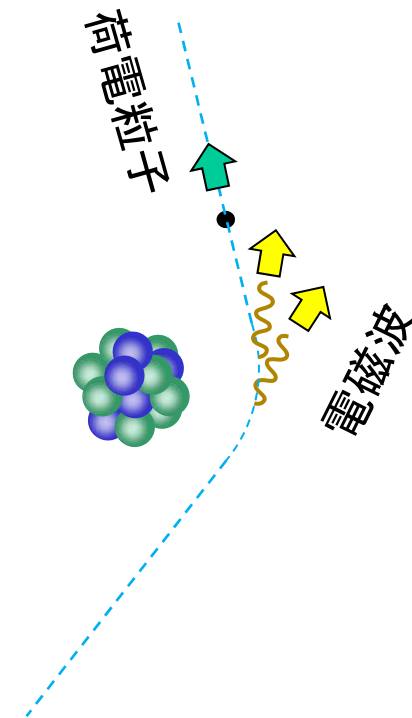


Figure 27.4: Range of heavy charged particles in liquid (bubble chamber) hydrogen, helium gas, carbon, iron, and lead. For example: For a K^+ whose momentum is 700 MeV/c, $\beta\gamma = 1.42$. For lead we read $R/M \approx 396$, and so the range is 195 g cm^{-2} .

Ref.: Physics Letters B667 (2008) 1
available on the PDG WWW page
(URL: <http://pdg.lbl.gov>)

制動放射

- Bremsstrahlung
 - ドイツ語だが、英語でもそのまま使われている
- 電子の様に原子核に比べて質量の小さい荷電粒子が原子核の側を通過する際、原子核の強い電場により加速(減速)される
- 原子核の方が質量が大きいため静止続けようとするためエネルギー・運動量を保存するために、荷電粒子がエネルギーの一部を電磁波として放出
- 放射長 (Radiation Length)
 - 入射時のエネルギーが $1/e$ になる厚み
 - $e=2.718\dots$ (自然対数の底)
 - 物質の性質を示す量としてよく使われる
 - 単位は $[g/cm^2]$



シンクロトロン放射

● シンクロトロン光・放射光

- シンクロトロン(加速器の一つ)で電子を加速しているときに、電子の軌道面から光が観測された
- 制動放射と同様に磁場で荷電粒子が曲げられることにより、電磁波が発生する
- 赤外光からX線まで発生させることができる
 - 放射光の周波数は、電子のエネルギーと磁場の強さで決まる
 - 高エネルギーの電子がシンクロトロンを一周する間に失うエネルギー
 - 電子のエネルギーの4乗に比例
 - 同じエネルギーなら電子の方が陽子に比べ 約 10^{13} 倍もエネルギー損失が大きい
- 放射線の測定というより、人工的に強度の強いX線を発生させるために使われている



SPring-8
大型放射光施設
兵庫県播磨科学公園都市



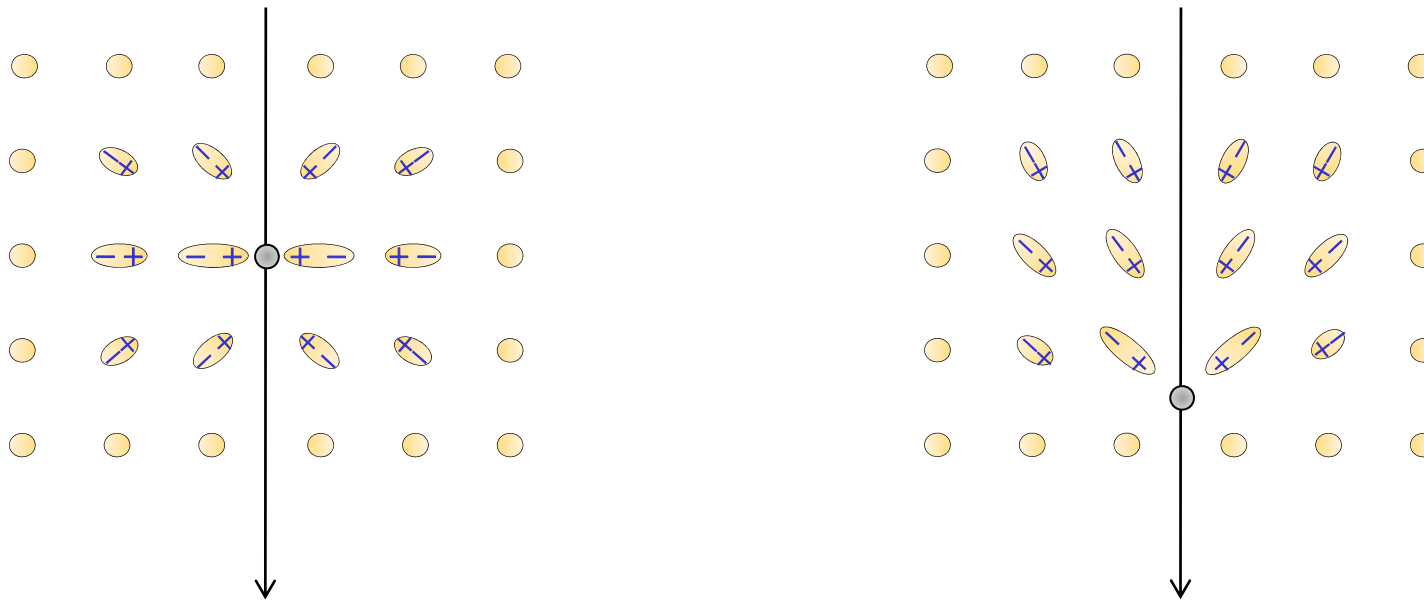
KEK Photon Factory
茨城県つくば市

チェレンコフ放射

- 荷電粒子が物質中を通過する際、その物質中での光速より荷電粒子が速い場合に光が発生する
 - 物質中での光速は、 c/n
 - c : 真空中での光速
 - n : 物質の屈折率
 - $\cos\theta = 1/(\beta n)$ となる角度 θ で放出
- 1934年、Pavel A. Cherenkov によって発見
 - 1958年ノーベル物理学賞

チェレンコフ放射

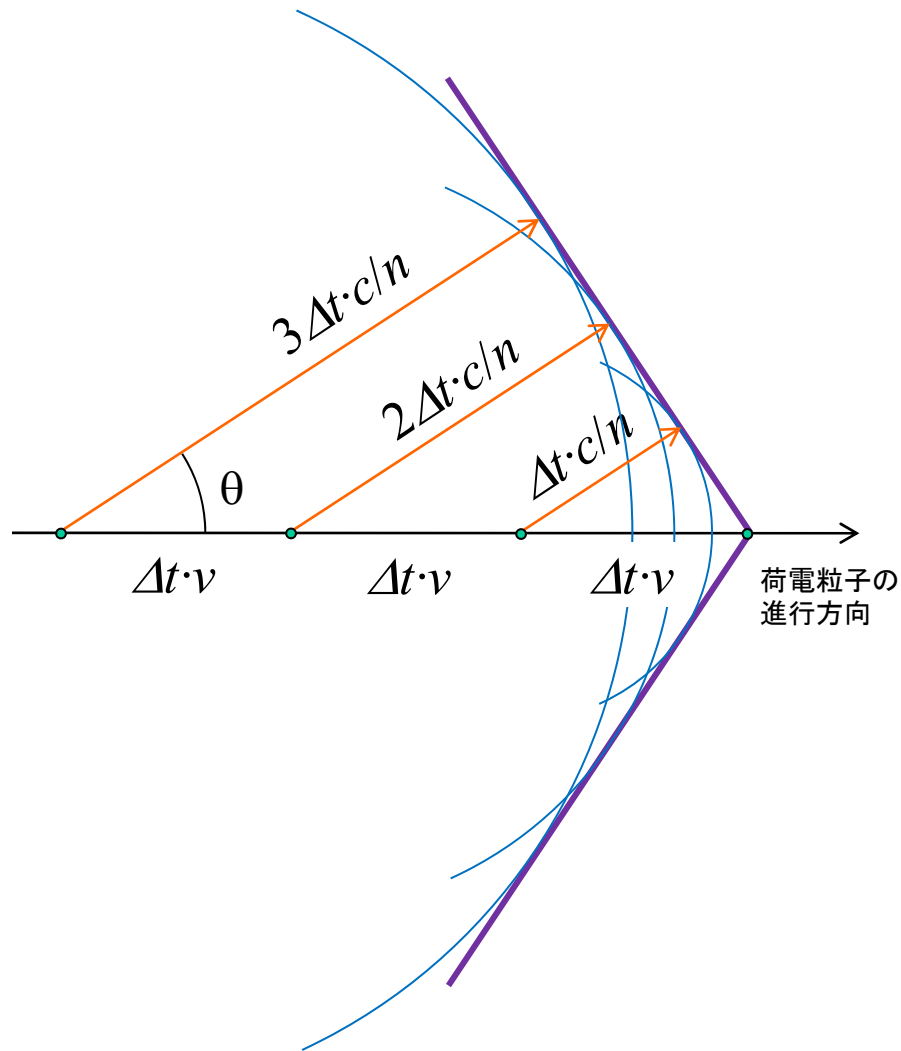
荷電粒子が通過するとき分子が分極する様子



遅い粒子だと分極が対象になり
分極が戻っても外部に電磁波が放出されない

早い粒子だと分極が非対称になり粒子の進行方向を向く
粒子が通過後、分極が戻り進行方向に電磁波を放出する

チェレンコフ放射



- 各点で分極が戻る際に発生する電磁波は球面波
- ホイヘンスの原理により、重ねあった波は進行方向に対し θ の角度を持って放出される

$$\cos \theta = \frac{\Delta t c / n}{\Delta t v} = \frac{1}{n v / c} = \frac{1}{n \beta}$$

- チェレンコフ光が放出される条件
 - $n\beta \geq 1 \quad \Rightarrow \quad \beta \geq 1/n$

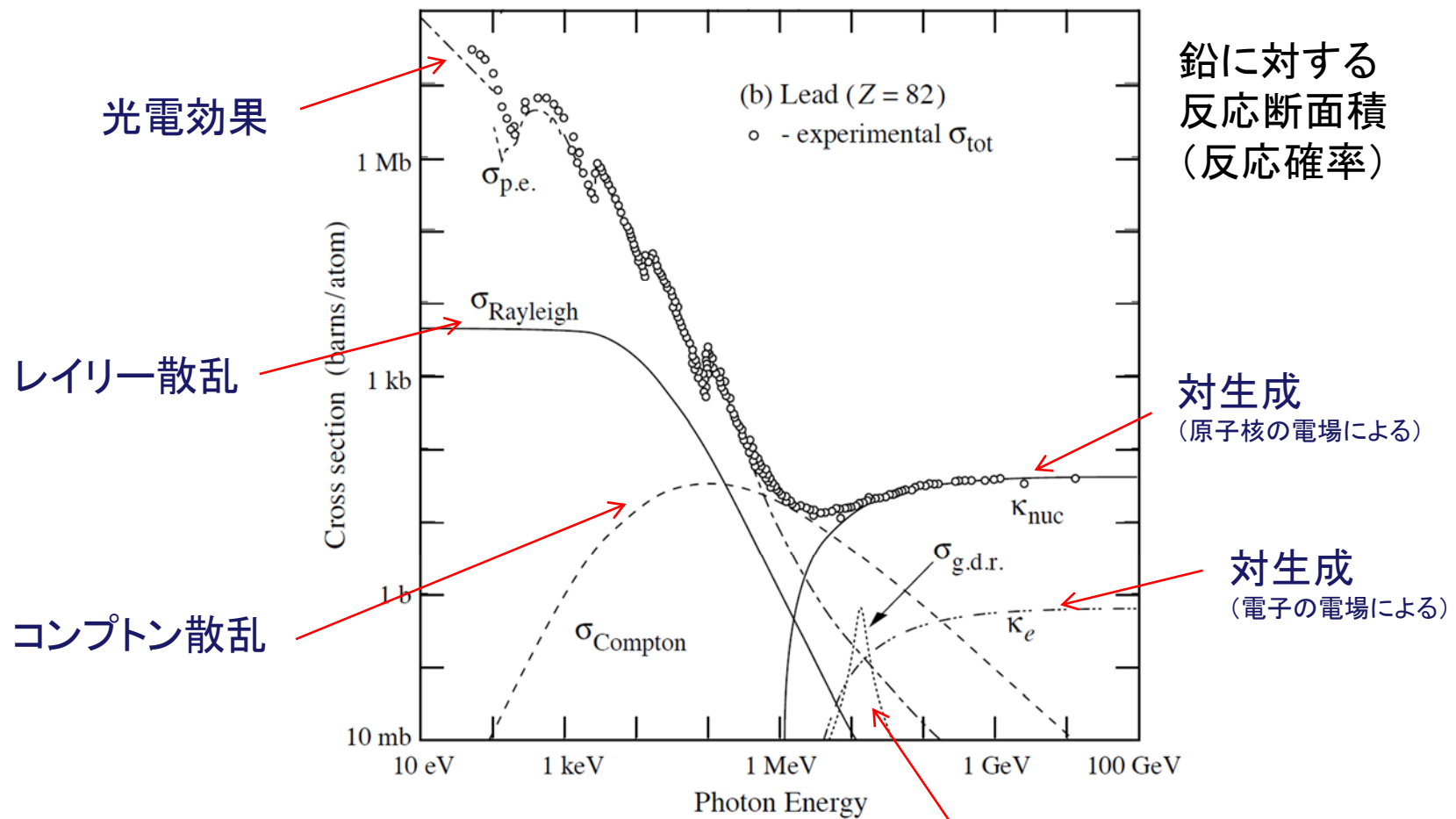


Interaction of γ /X rays with materials

γ /X線と物質の相互作用

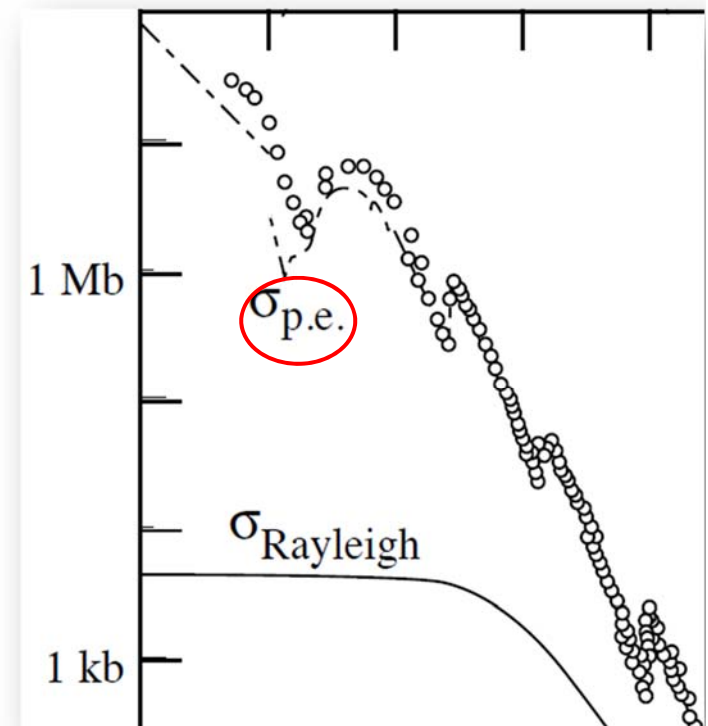
γ /X線と物質の相互作用

- 光子は荷電粒子とは異なった相互作用によってエネルギーを失う



光電効果

- 光子が原子の束縛電子に吸収される
- エネルギーを電子に与え、電子が原子核から飛び出す
 - 光子は吸収される
 - 電子の運動エネルギー
 - $T_e = E_\gamma - B$
 - E_γ : 光子のエネルギー
 - B : 電子の束縛エネルギー(仕事関数)
 - 電子軌道のエネルギーレベルによって特徴的なエッジが見える



レイリー散乱・コンプトン散乱

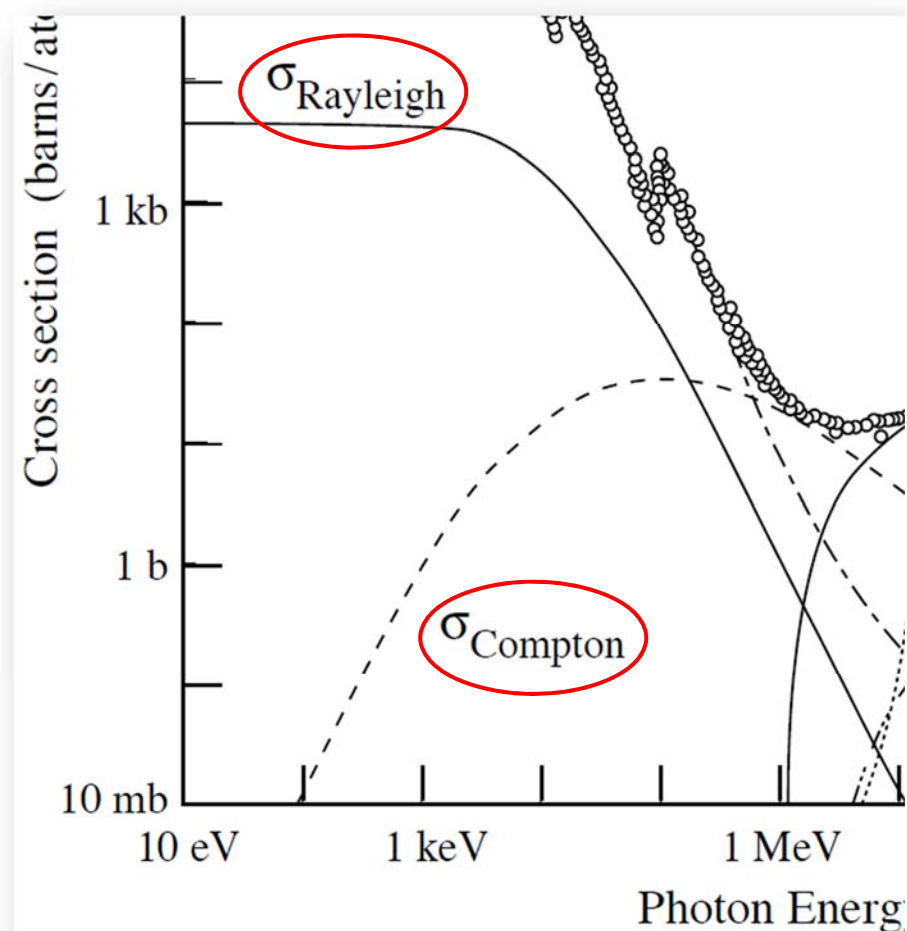
- 光子と粒子との散乱

- レイリー散乱

- 低いエネルギーでは原子全体で光子が反跳を受ける

- コンプトン散乱

- エネルギーが高い = 十分波長が短いと、軌道上の電子もほぼ静止していると思なせ、一つ一つの電子と散乱を起こす
 - 反応断面積(確率)は、O.Klein と仁科芳雄によって初めて正確に計算された
 - 相対論効果と量子力学効果を考慮
 - Klein-Nishina formula と呼ばれている



コンプトン散乱

● 散乱光子と反跳電子のエネルギー

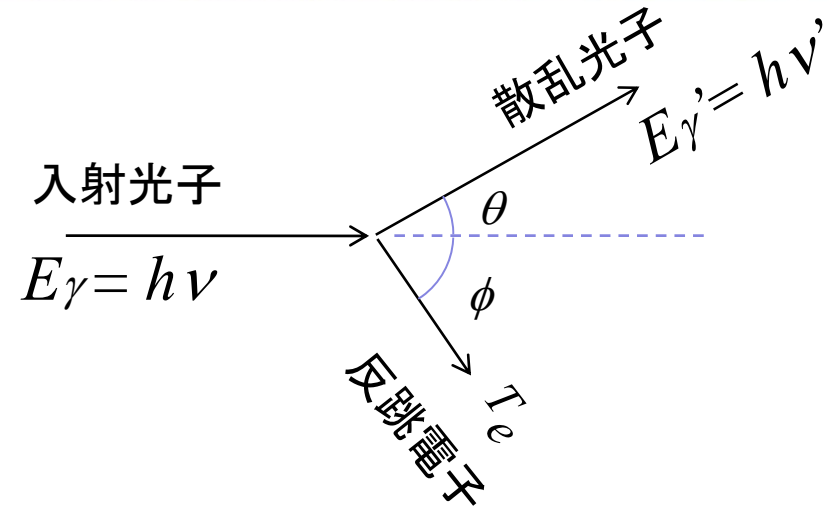
- エネルギー・運動量保存則から求められる

(ただし、相対論的に扱う)

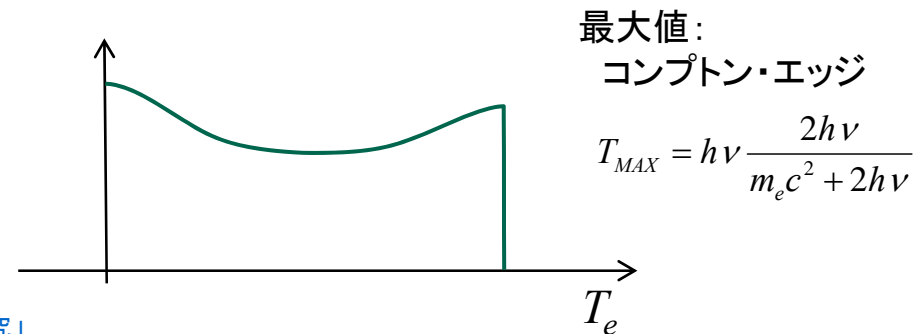
$$h\nu' = h\nu \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu}$$

$$T_e = h\nu \frac{(1 - \cos \theta) h\nu}{m_e c^2 + (1 - \cos \theta) h\nu}$$

注: この計算の場合電子は静止していると仮定

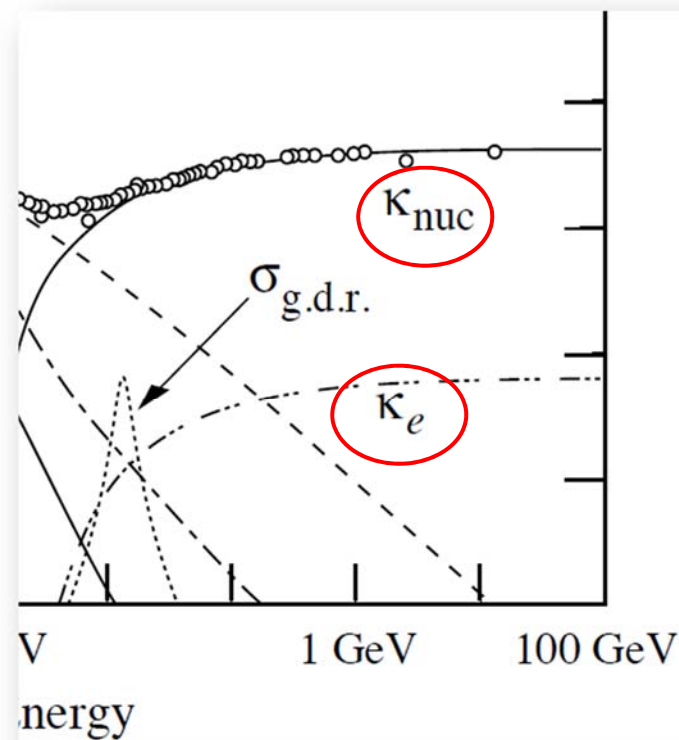


散乱光子の角度に依存
 $\theta = \pi$ の時に最大



電子・陽電子対生成

- 光子が原子核の作る電磁場と相互作用し、電子と陽電子が生成される
 - 光子のエネルギーは、電子と陽電子の質量エネルギーの和より大きくないと起こらない
 - $E_\gamma > 2m_e c^2$
 - 物質中でのみ起こる
 - 真空中では、エネルギー・運動量保存則を満たさないので生成されない





Detectors

検出器

検出器

- 検出器のシグナルとなるもの

- 電離

- ガス(電子・イオン)
- 半導体(電子・正孔)

- シンチレーション光(蛍光)

- シンチレーション光: 荷電粒子が通過する際に電子が励起、基底状態に戻る際にでる光
- シンチレーター: 有機・無機結晶、液体がある
- 発生した光は光検出器(主として光電子増倍管)を用いて測定

- チェレンコフ光

- 発生した光は光検出器(主として光電子増倍管)を用いて測定

電離を利用した検出器

- 電離による生じた電子・イオンを測定

- 霧箱

- 過冷却状態の気体の中を荷電粒子が通過すると、気体分子のイオン化が起き、イオンを殻として気体が液化する（飛行機雲と同じ原理）
- 軌跡を目でみる事が出来る

- 泡箱

- 液体水素を使用
- 荷電粒子が通過する際、減圧し順安定状態にすると、電離したイオンを殻に液体水素が沸騰し小さな泡が出来、目で観測出来る

- 電離箱

- 電極間にガスを満たしておく、電離された電子・イオンが電極でシグナルとして測定出来る
 - ガイガー・ミュラー計数管
 - 比例計数管
 - スパーク・チェンバー
 - ドリフト・チェンバー
 - そのほか多様なものが開発されている

電離を利用した検出器

- 電離による生じた電子・イオンを測定(続き)
 - 写真乾板(エマルジョン)
 - 電離により感光、飛跡を検出
- 電離による電子・正孔を測定
 - 半導体検出器
 - 逆電圧をかけておくと、空乏層(電子・正孔が殆ど存在しない領域)が増える
 - この部分を荷電粒子・光子が通過すると電子・正孔が生成されシグナルとして読み出される

放射線計測に関する参考書

- Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments:
A How-to Approach
 - William R. Leo
 - Springer; 2nd edition, 1994
- 放射線計測ハンドブック
 - Glenn F. Knoll (木村逸郎、阪井英次 訳)
 - 日刊工業新聞社; 第3版, 2001年
- 粒子物理計測学入門
 - 福井 崇時
 - 共立出版、1992
- 岩波講座 物理の世界〈4〉素粒子を探る粒子検出器
 - 政池明
 - 岩波書店、2007
- Review of Particle Physics
 - Particle Data Group
 - Web で登録すれば無料で送ってもらえる
 - <http://pdg.lbl.gov>

素粒子・原子核物理関連のWeb

- KEK: キッズサイエンティスト
 - <http://www.kek.jp/kids/index.html>
- The Particle Adventure
 - <http://www.particleadventure.org/>
- Contemporary Physics Education Project
 - <http://www.cpepweb.org/>



Experimental Study of Elementary Particle and Nuclei and
Applications of Radiation Measurement for Medical/Engineering Fields

素粒子・原子核の 実験的研究および 放射線測定方法の 医学・工学分野への応用

素粒子・原子核の実験的研究

- 種々の放射線の発見により、物質を形作る大本が何かという疑問が生じた
 - － ラザフォード散乱による原子核の発見
 - 原子核 - 陽子・中性子 - クォーク、とさらなる内部構造
 - － 物質を構成している最小要素は何か？
 - 素粒子物理学
- 実験観測装置の発展
 - － 素粒子・原子核の実験的研究
 - 乱暴にいうと、高エネルギーに加速した粒子を衝突させ、どういう反応をするかそこから何が出てくるかを調べる
 - － 放射線を測定する原理は、素粒子・原子核の実験で粒子を測定するものと同じ

今日の原子核物理

- 原子核の構造および核力の理解
 - 陽子・中性子から出来ていることは判明した
 - 核力の源
 - 中間子の交換(湯川理論)
 - クォーク間に働く強い相互作用、量子色力学(QCD)で記述される
 - しかし、
 - 陽子・中性子からなる多体系での振る舞いが完全に解明にされていない
 - » 二体の相互作用が分かっても、多体系に拡張可能ではない
 - 自然界に存在しない、原子核を作り性質を調べる
 - 超重元素の探索
 - 理化学研究所での113番目元素の発見
 - 陽子過剰核、中性子過剰核を生成
 - ハイパー核を生成
 - sクォークを含むバリオン(核子の仲間)を原子核中に束縛させる

今日の原子核物理

● ハドロン物理学

- ハドロン = クォークからなるメソン(中間子)、バリオン
- 素粒子物理と原子核物理にまたがる領域
 - 最近では原子核物理の一部とされるが、歴史的には素粒子物理とされたこともある
- 中間子や核子の性質やその励起状態の性質を研究
 - QCDを元にしたモデルでそれらが完全に記述されるか？
 - 例: ハドロン質量の予言
 - » 重たいクォーク(b, c) から出来たハドロンはよく記述出来る
 - » が、u, d, s からなるものは、基底状態は記述出来ても励起状態が理論と実験で一致しない
 - » ハドロン質量は、クォークが真空を満たしているクォーク・反クォークから抵抗受けることによって得られると考えられている
 - » 素粒子の質量は、真空を満たしているヒッグス粒子から抵抗を受けて得られると考えられている

今日の原子核物理

- クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)

- ハドロンからクォークの自由度へ

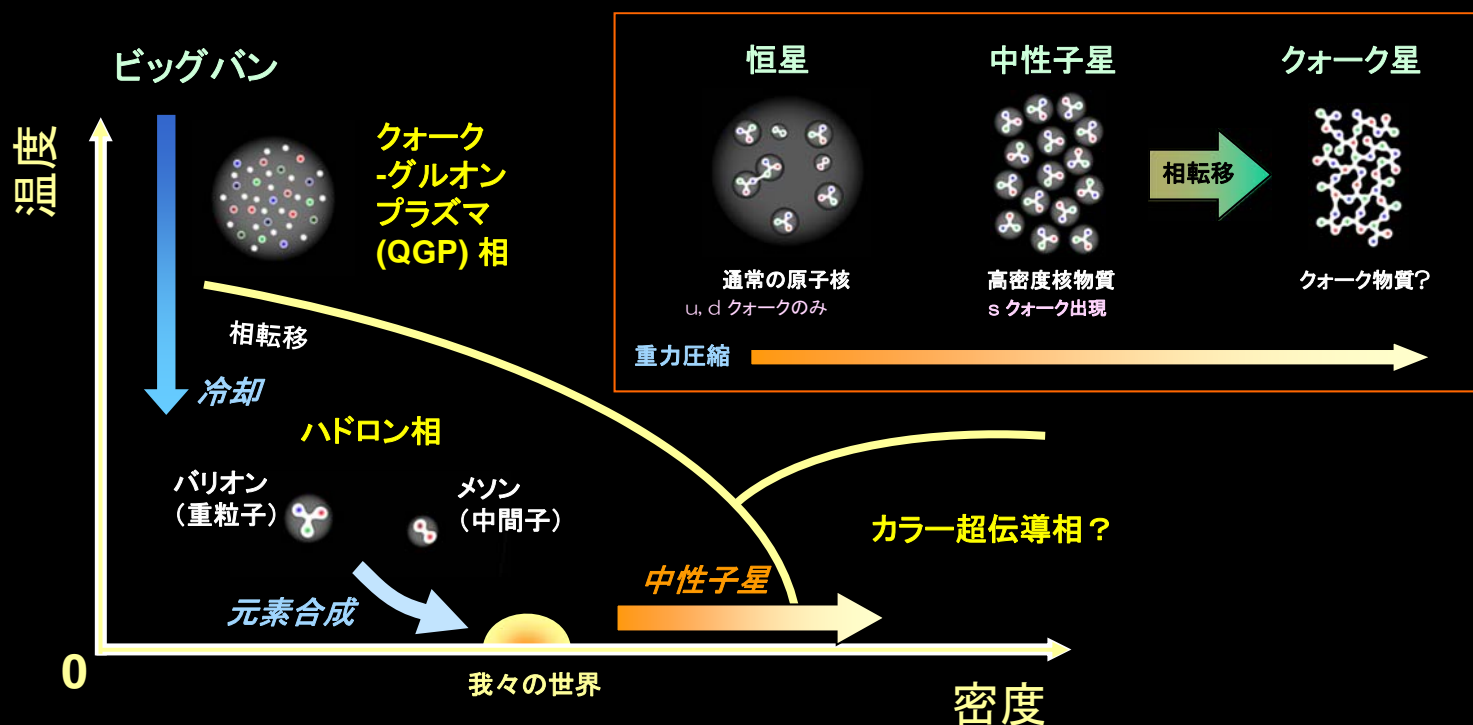
- 量子色力学からの予言
- 通常クォークはハドロンから取り出せないが、高温・高密度状態ではクォークが漸近的自由粒子と見なせる

- 実現されるであろう状態

- 初期宇宙 (高温状態)
 - 素粒子が出来、クォークが結びついてハドロンが形成されるまでの間
- 中性子星の内部 (高密度)
- 相対論的高エネルギー重イオン衝突 (高温・高密度)
 - 地球上で唯一実験可能なのは、重イオン衝突による実験
 - 1970年代にLBNLのBevarac で核子辺り 1 GeV/c まで重イオンが加速できるようになってから実験を中心として発展してきた。

宇宙と原子核物理の関係

宇宙における物質の進化



- ビッグバン直後のクォーク-グルーオン プラズマからハドロンへの相転移(核子の生成)
- 恒星中および超新星爆発における軽い元素から重い元素の合成(原子核の生成)
- 超新星爆発からの中性子星(高密度核物質)の生成
- 中性子星からストレンジネスを含むクォーク星の生成

素粒子物理

- 物質を構成する最小要素

- クォークやレプトンは本当に素粒子か？

- 超弦理論

- 理論先行、実験的に検証が出来るかどうか不明

- 四つの力の統一

- 電磁気力、弱い力、強い力、重力

- 電磁気力と弱い力はワインバーグ、サラム、グラシヨウによって統一された

- 電弱統一理論

- 1979年ノーベル物理学賞

- 電磁気力、弱い力、強い力を統一するモデル：大統一論

- 大統一論(Grand Unification Theory, GUT)による予言

- » 通常は存在しない崩壊モードと陽子の寿命の予言（カミオカンデの実験と一致していない）

- » $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

- » 磁気モノポールの存在（まだ見つかっていない）

- 四つ全ての統一はまだ先

- 素粒子が質量を持つ機構

- ヒッグス粒子の探索

- アメリカ、フェルミ研究所 Tevatronでの実験

- ヨーロッパ、CERN. LEP. LHC での実験

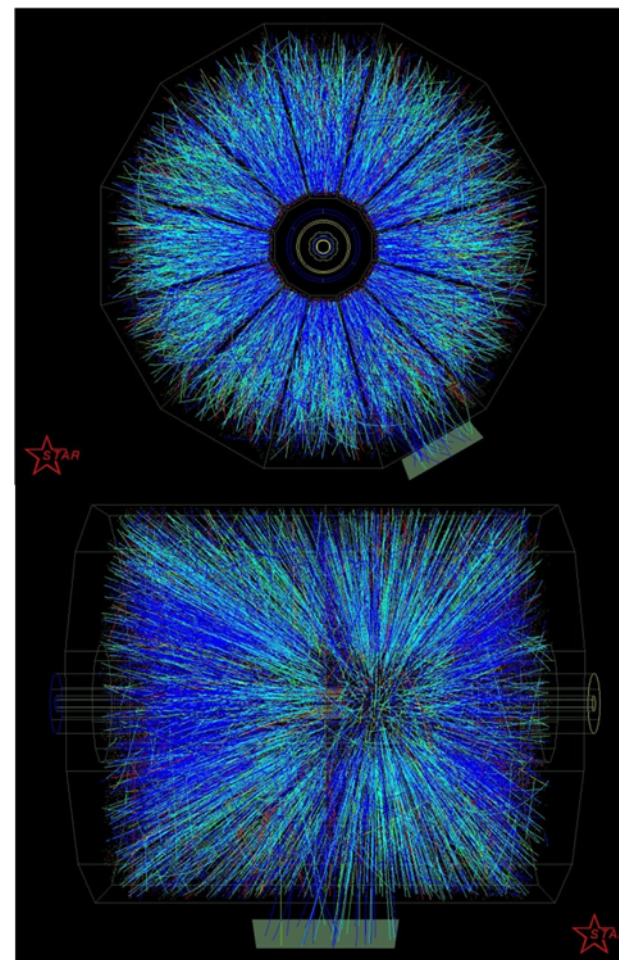
- 標準模型を越えた事象の探索

素粒子物理学

- 加速器を用いた実験的研究
 - 歴史的に衝突させる粒子のエネルギーを上げていくことで、より小さい構造を探索してきた
 - 高エネルギー物理学
 - 時代と共に、何が素粒子とされているかは異なる
 - そのときの加速性能で最高エネルギーが決まる
 - その時点で分かった最小要素＝素粒子
- 非加速器物理
 - 加速できるエネルギーに上限が見えてきた
 - 土地および予算の問題
 - LHC(ラージ・ハドロン・コライダー)
 - » 直径約8.5kmの円形、建設予算約4600億円
 - ILC(国際リニア・コライダー)
 - » 30kmを越える直線、建設予算 1兆円規模
 - 陽子崩壊(カミオカンデ)、ダブルベータ崩壊
 - 宇宙線の利用
 - PeV (10^{15} eV)以上のエネルギーを持つものもある

素粒子・原子核物理での測定

- 何かを反応させて出てくるものを調べる
 - 原子核
 - ハドロン (バリオン、メソン)
 - レプトン (電子、 μ 粒子、ニュートリノ)
 - 光子
- 何を測定から知りたいか？
 - 運動量、エネルギー
 - 粒子の種類
 - 電荷
 - 質量
- 基礎となる物理
 - 電磁相互作用
 - エネルギー・運動量保存則
 - 相対論的運動学



核子あたり 100GeV+100GeV の金金衝突
イベントディスプレイ(BNL-RHICでのSTAR実験)

測定方法

● 運動量、電荷

－ 磁場中で荷電粒子がローレンツ力を受けて曲がる

- 荷電粒子が物質を通過する際に生じるシグナルから、飛跡を再構成
- 曲率から運動量が求められ、曲がる方向から電荷がわかる
 - － 一様磁場中なら $p [\text{GeV}/c] \cong 0.3 B [\text{T}] \rho [\text{m}]$
 - » B :磁場、 ρ :曲率半径

－ 飛跡の検出には

- 電離を利用したガス増幅検出器
 - － 50～300 μm の位置分解能
- シンチレーション・カウンター
 - － シンチレーター(蛍光物質)と光検出器
 - » シンチレーターのサイズで位置分解能は決まる
- 半導体検出器
 - － ピクセル型だと $\sim 2 \mu\text{m}$ の位置分解能
 - － ストリップ(細い筋状)型だと、幅の1/3程度

測定方法

● エネルギー

－ ハドロン

- 電離等によるエネルギー損失により物質を通過する際に少しずつエネルギーを落とすしていく
 - － 通過する粒子の質量・電荷数が異なれば、同じ運動量をもった粒子が同じ物質中で落とすエネルギーが異なる
- 粒子が止まるまでに落とした全てのエネルギーを測れば元々持っていたエネルギーが分かる

－ 光子

- ~ 1 MeV 以上では、電子・陽電子対生成が主
 - － 電子： 制動放射で光子を放出したり、電離でエネルギーを落とす
 - － 陽電子： 物質中の電子対消滅して光子を二つ以上放出
 - － 電子・陽電子と光子を放出するプロセスが繰り返される(電磁シャワー)

－ 電子

- ~ 20 MeV以上では制動放射が主
 - － 光子を放出し、そのあとのプロセスは光子の場合と同じ
 - － 電磁シャワーが生成される

測定方法

● 粒子の質量

- 飛行時間と運動量を組み合わせる
 - 検出器間を通過する時間を測定
 - 飛跡と時間から速さ、運動量と速さから質量を求める
- 運動量とチェレンコフ光を組み合わせる
 - チェレンコフ光の有無
 - 同じ運動量の粒子の場合、 β の違いは質量の違い
 - $\beta \geq 1/n$ の条件を満たしていれば、ある質量より小さい
 - チェレンコフ光の放出角度
 - 放出されたチェレンコフ光と荷電粒子とのなす角は β によって決まる
 - 角度から β がわかり、運動量と組み合わせれば質量が分かる

放射線計測との関係

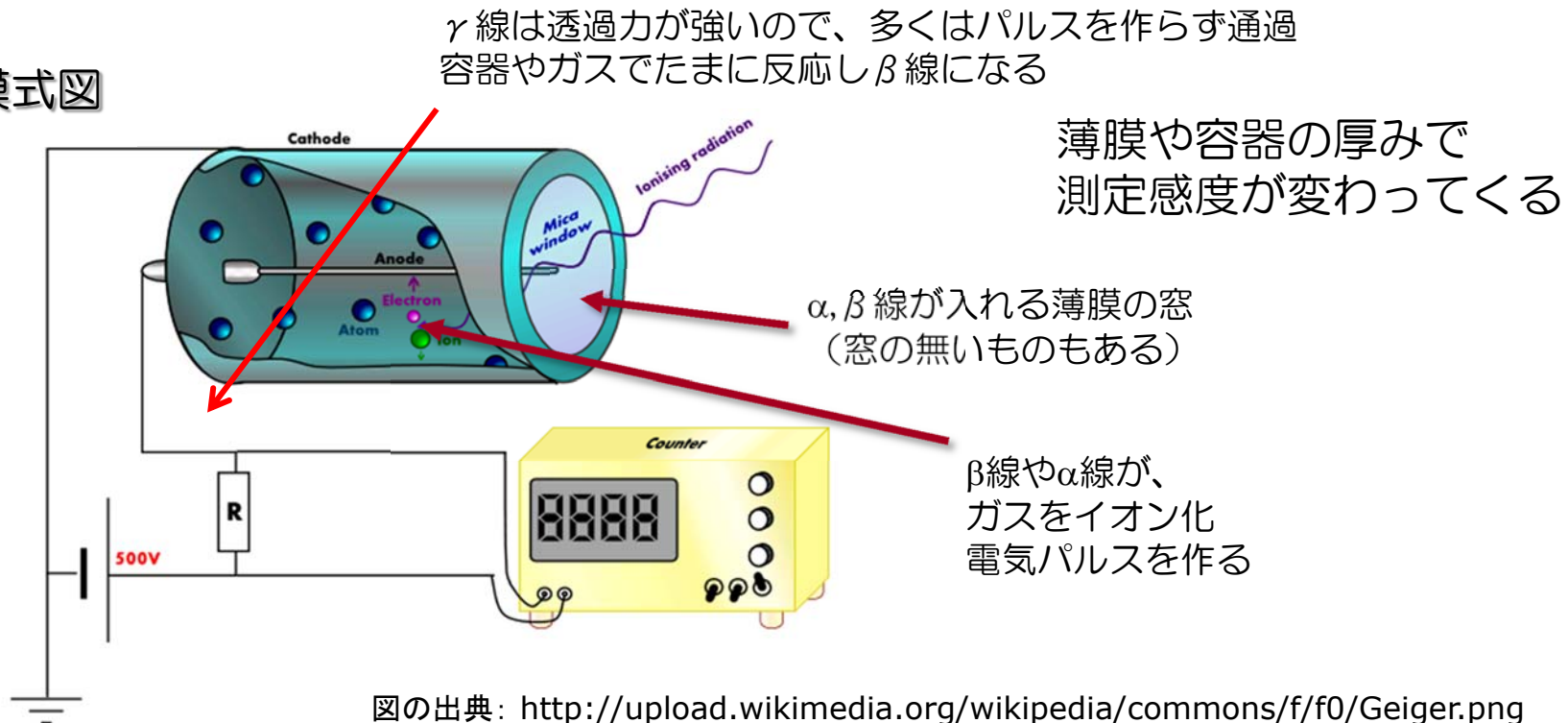
- 人体への影響(等価線量)を見積もる
 - 放射線の個数とエネルギーを知る必要がある
 - 必要な検出器の情報
 - 放射線によって作られた電気パルス(信号)の数
 - 放射線が通過する際に落としたエネルギー
 - 放射線自体が持っていたエネルギーを見積もれる
 - 測定器の計測率
 - 放射線が検出器を通過する際に100%反応するとは限らない
- 放射線の測定技術 = 素粒子・原子核実験の測定技術

ガイガー・ミュラー管

● 特徴

- 放射線の個数を数える、が
- エネルギーは測定出来ない
 - 多くの機種では、線量率($\mu\text{Sv/h}$)に換算するために ^{137}Cs の γ 線だけが反応したと仮定 (β が入ると大きな線量率の数値を表示してしまう)

模式図



シンチレーション・カウンター

- シンチレーション(蛍光)

- 放射線を光(可視光)に変える

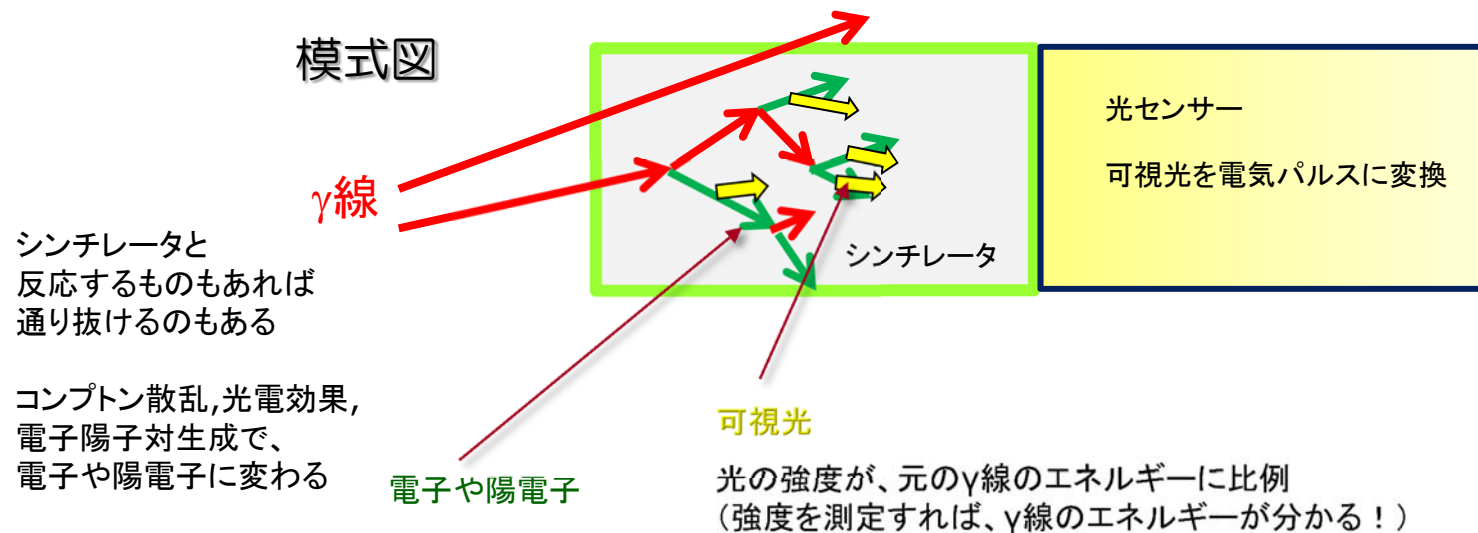
- 特徴

- 放射線の個数を数える

- エネルギーを測定することが可能 → 放射線量に換算できる

- 本来は、 β 線(荷電粒子)も γ 線も測定出来る

- しかし、 γ 線サーベイメータは、 β 線を測定しないように金属で遮蔽されている





Examples of Detectors Used in Experiments

実験で使われている 検出器の例



東北大学電子光物理学研究センター で行われている、 光子-中性子反応によるストレンジネス生成実験

光子-中性子反応によるストレンジネス生成実験

- ストレンジネス

- s(ストレンジ)クォークを含んだハドロン

- s クォーク

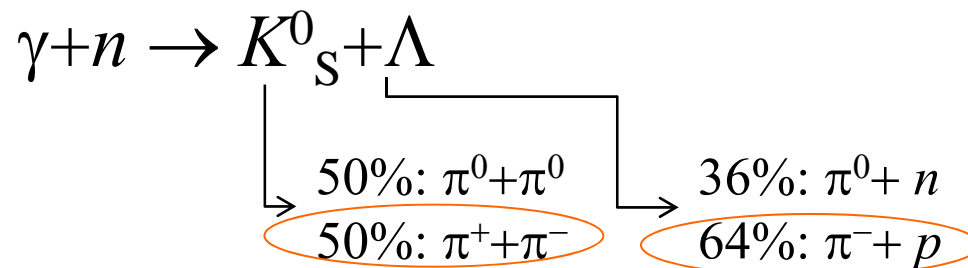
- 陽子・中性子を構成している u, d クォークより質量が大きい
- 通常の状態では存在しない

- 生成後、 10^{-10} s 程度で崩壊する

- 対生成により生じる

- sクォークと反sクォークが生成

- 光子-中性子反応

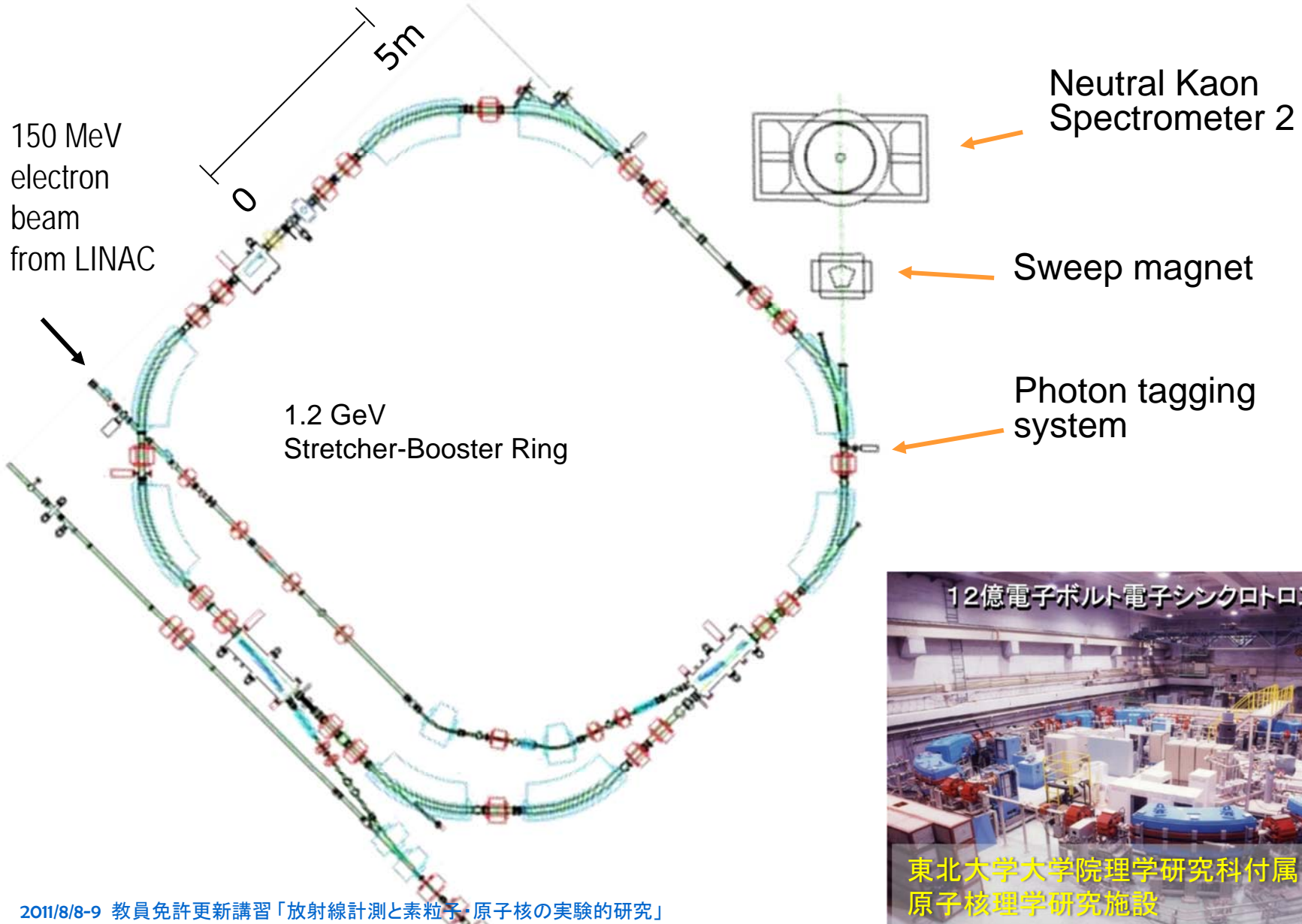


電荷を持った粒子に崩壊するチャンネルを捕まえる

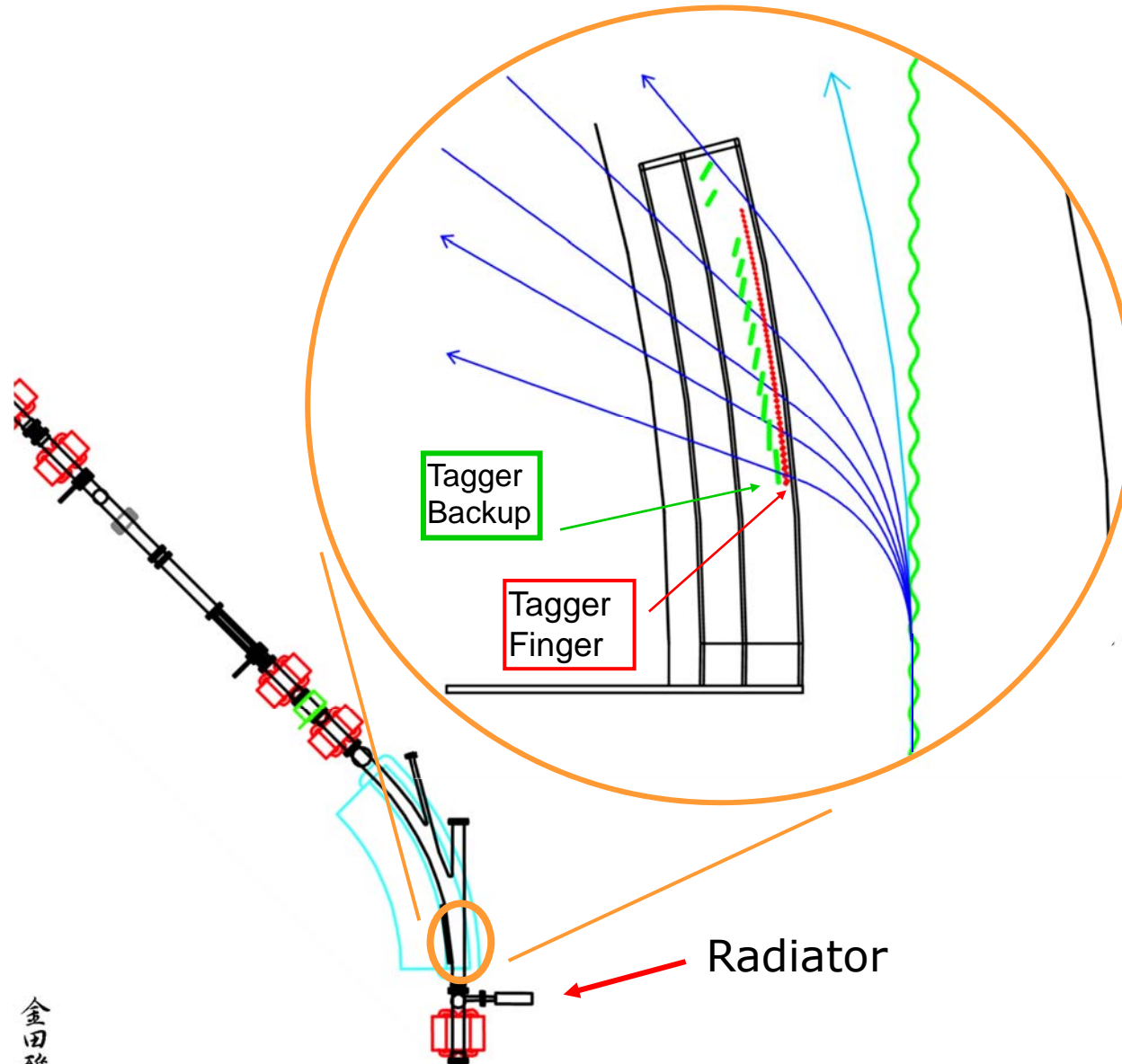
- 生成閾値(作られる最小の値)近傍で、反応断面積の運動量依存性を調べている

- ストレンジ生成に関する理解

電子加速器、 γ 線発生装置、スペクトロメータ



γ 線の生成と標識化



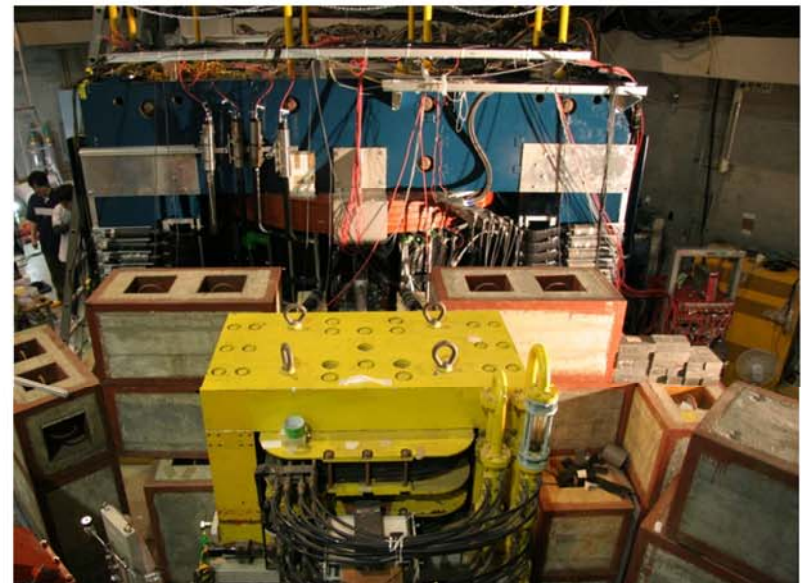
• Photon beam

- Electron beam on $11 \mu\text{m}$ ϕ carbon wire
- Tagged by electron which has energy loss
- $E_{\gamma} = 0.8 - 1.1 \text{ GeV}$
 - from 1.2 GeV electron beam
- 6 MeV coverage per the tagging counter

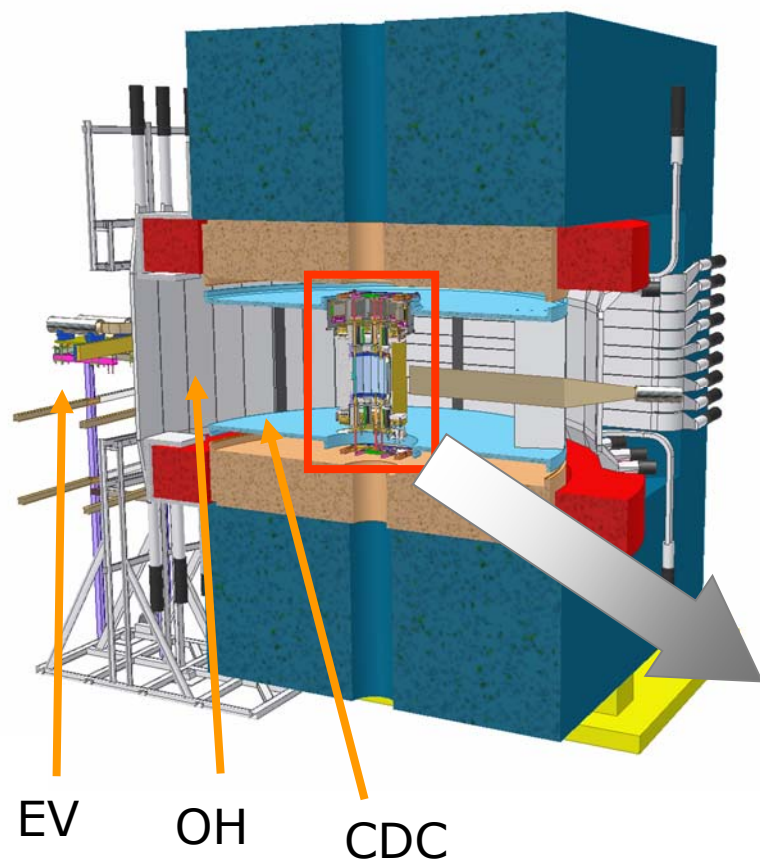
スペクトロメータ

- スペクトロメータ
 - 直訳すると一般的には分光器
 - 電磁波(光)の強度分布を周波数の関数で測定する物
 - 素核実験では、反応で生じた粒子を測定する検出器群のことを指す
 - 構成要素
 - 電磁石
 - 飛跡検出器
 - 飛行時間検出器
 - 等々
 - 電磁石を使って運動量を測定することから、「磁気スペクトロメータ」とも呼ばれる

NKS2

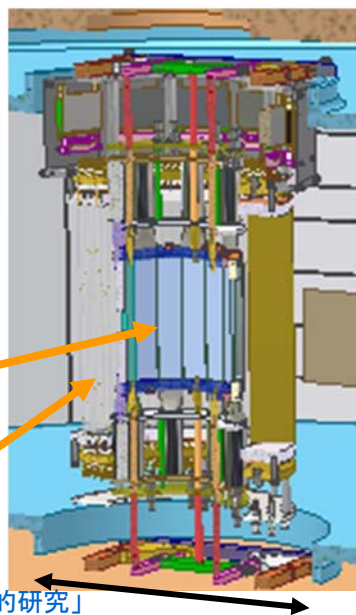


NKS2



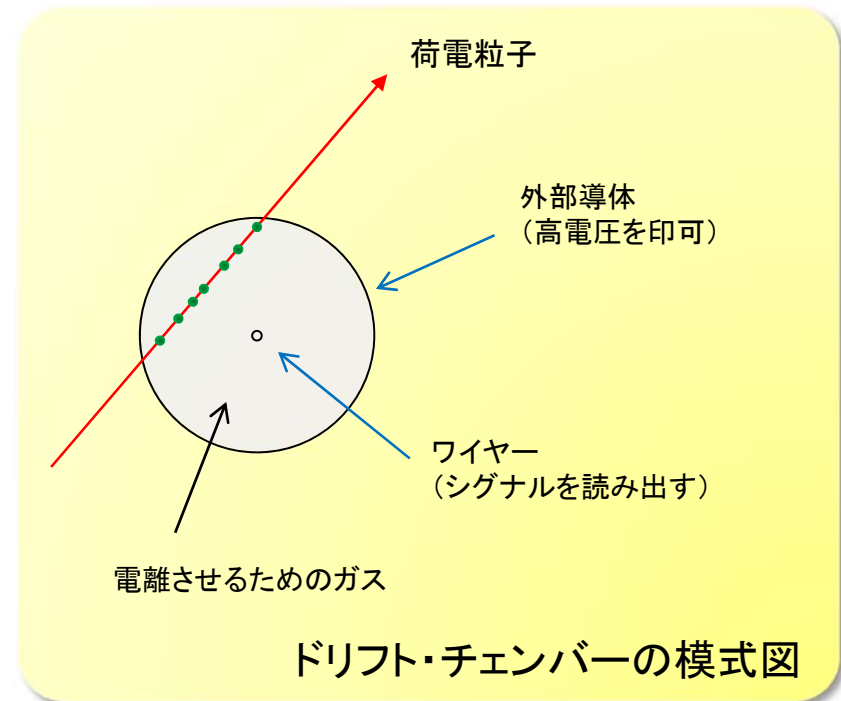
- Two Drift Chambers(飛跡検出)
 - Cylindrical Drift Chamber (CDC) and Straw Drift Chamber (SDC)
- Two Hodoscopes(飛行時間検出)
 - Inner and Outer Hodoscope (IH and OH)
- Electron Veto(バックグラウンド除去)
- ターゲットは液体重水素を使用
 - 中性子だけ集めることは不可能
 - 上部から中心部に向かっておろす

IH
SDC



ドリフト・チェンバー

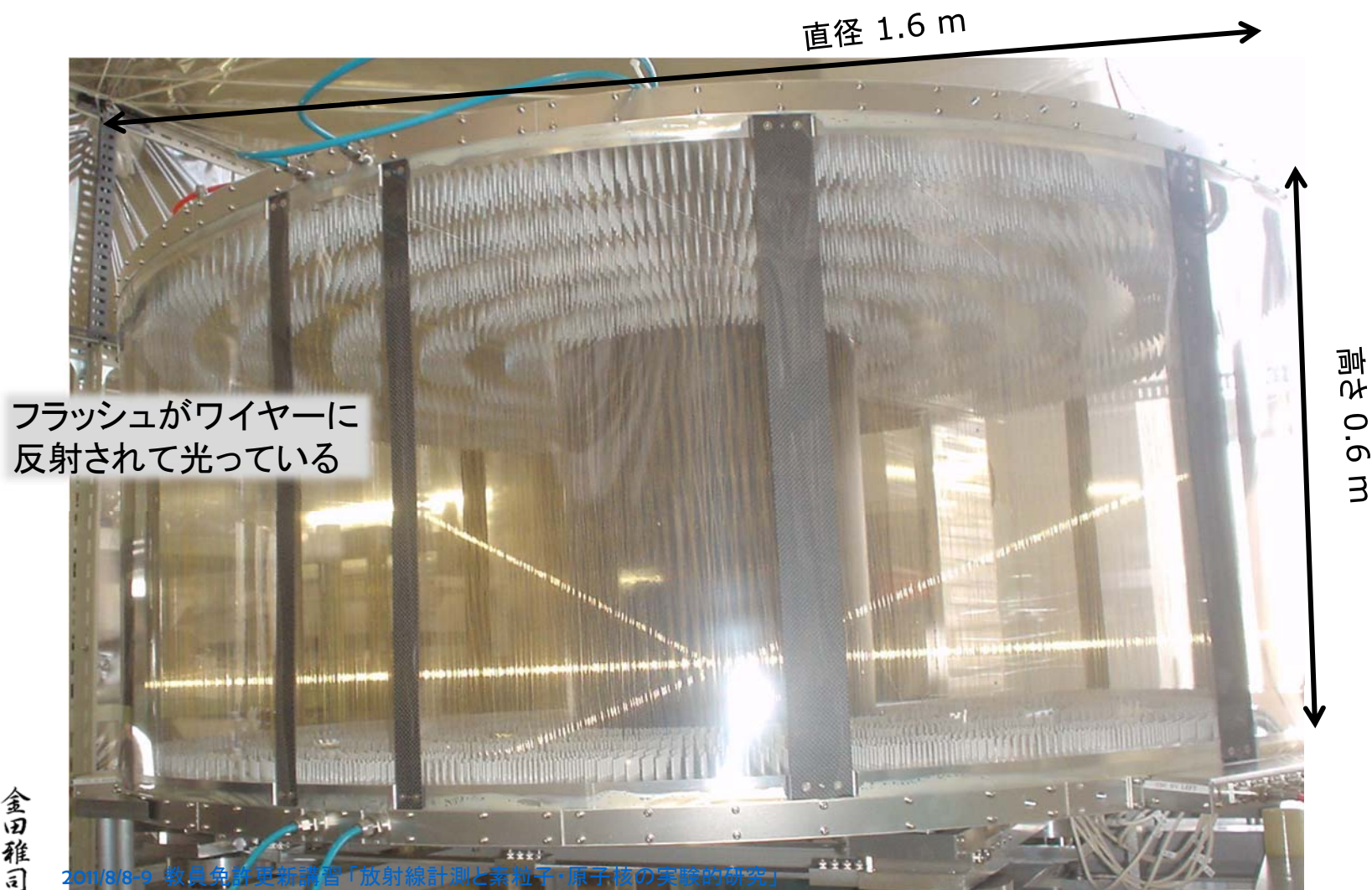
- 電離を利用した位置検出器の一種
- 希ガス+多原子分子のガスを使用
 - ArやHe
 - 電離により電子・イオン対を作る
 - メタン、エタン、イソブタン
 - 電子が希ガスとの衝突で軌道電子を励起することで生じる光・X線を級数させる
- 測定原理
 - 荷電粒子が通過するとその軌跡にそって電離が生じる
 - 電離で生じた電子はワイヤーに移動(ドリフト)していく
 - ドリフトの速さ: $\sim 5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (c の 10^{-4} 程度)
 - ワイヤー近傍は強い電場
 - 急激な加速によりなだらかに電子が新たな電子・イオン対を作る
 - $10^5 \sim 10^6$ 程度まで電子が増加
 - 荷電粒子が通過した時刻からどのくらい遅れてシグナルがワイヤーに到着したかで、荷電粒子とワイヤーの距離が求まる
 - シグナルはそのままでは弱いので、オペアンプ等を用いたアンプ(増幅器)を通す



注:外部導体はこの図では面だが実際はワイヤーで長方形や六角形にすることが多い
← 荷電粒子が余分に反応する物質を増やしたくないから

ドリフト・チェンバーの例

- NKS2実験で使用しているドリフト・チェンバー



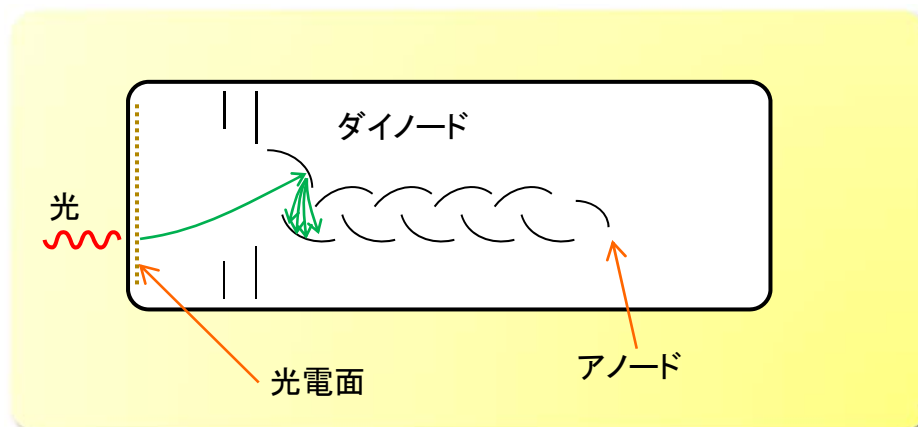
シンチレーション・カウンター

- プラスティック・シンチレーター

- 荷電粒子が通過する際、分子の軌道電子を励起させる
- 励起状態が基底状態に落ちて来るときに可視光から紫外光の光を発生

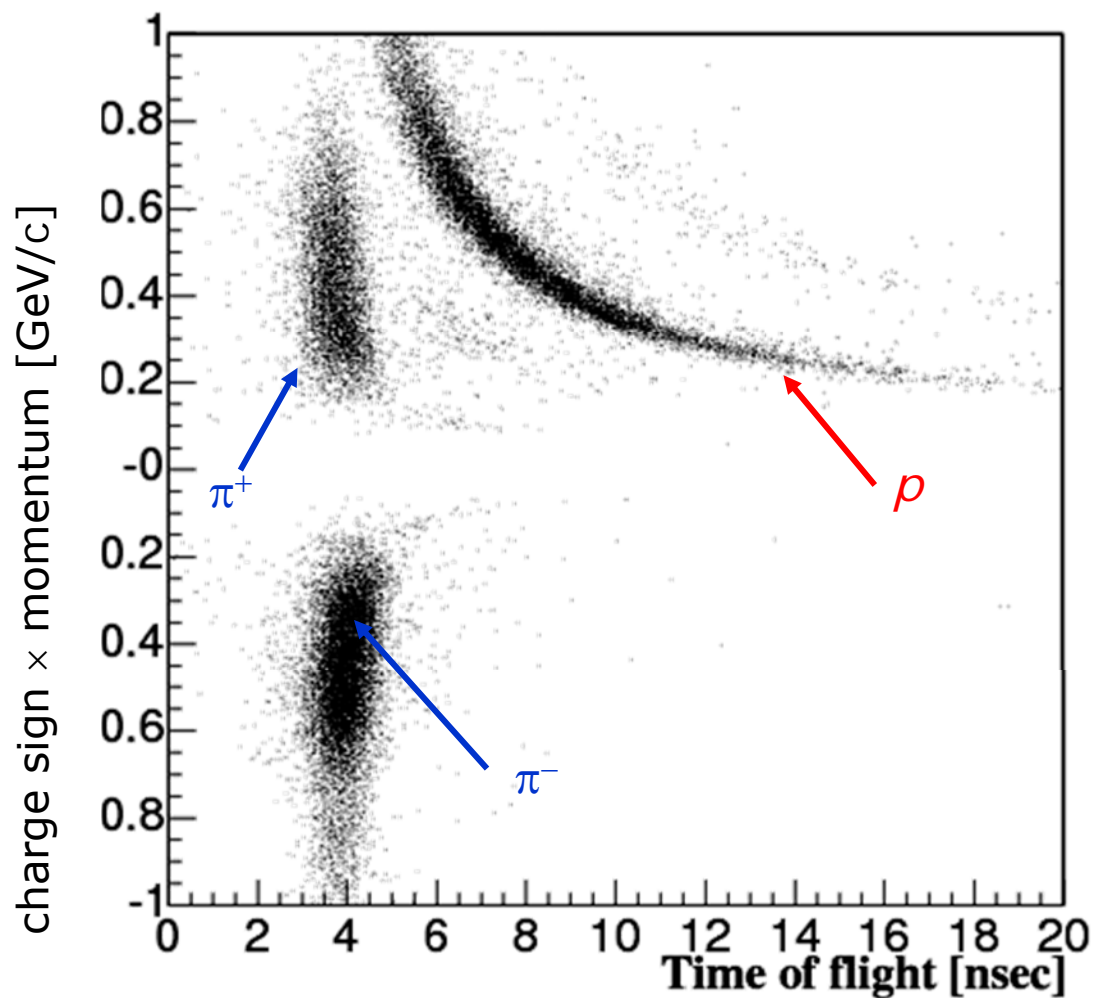
- 光電子増倍管(PMT)

- 光を光電効果で電子に変換
- 高電圧をかけた電極に多数回衝突することで電子一つが $10^6 \sim 10^7$ 程度まで増幅される



粒子識別

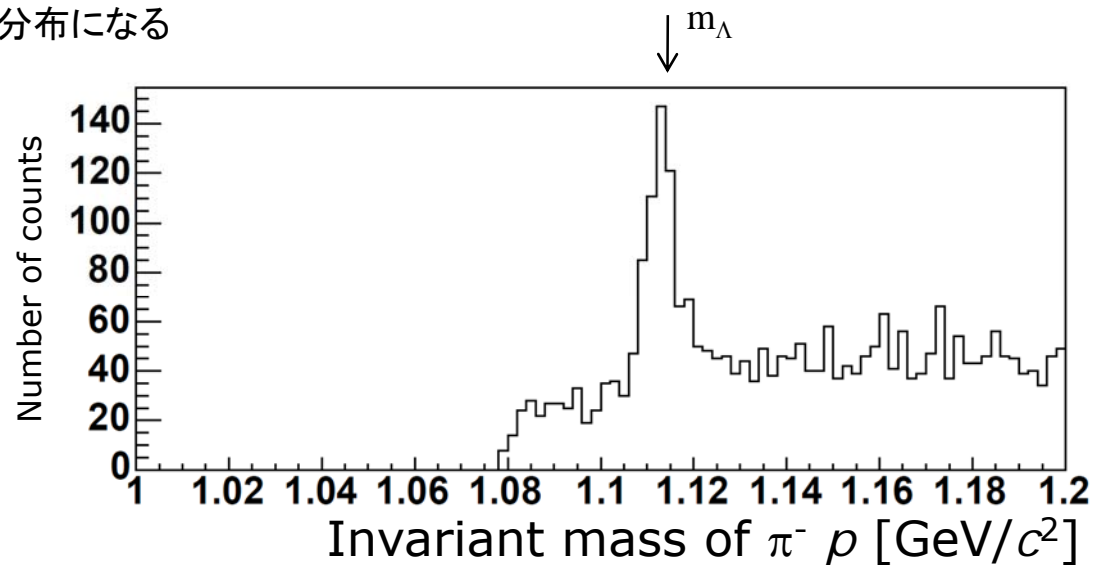
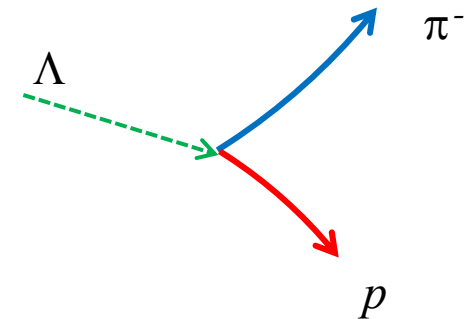
- 飛行時間と運動量の相関



粒子識別

● 崩壊した粒子(娘)から親粒子の再構成

- 娘に対応する粒子の組を探す
 - 飛跡が近いもの
- エネルギー・運動量保存則から親粒子の質量を計算
 - 娘粒子の運動量: 飛跡から求まっている
 - 娘粒子の質量: 粒子識別から知っている
- 組み合わせが正しい場合
 - 期待されている質量の場所にピークが立つ
- 間違っている場合
 - ピークにならず広がった分布になる

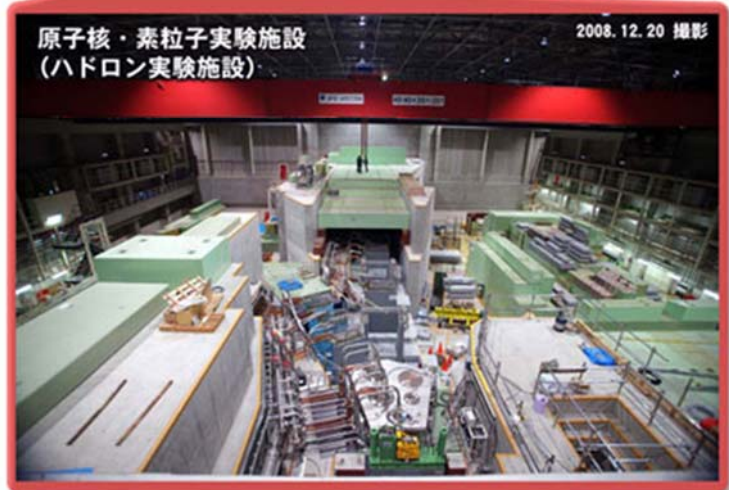




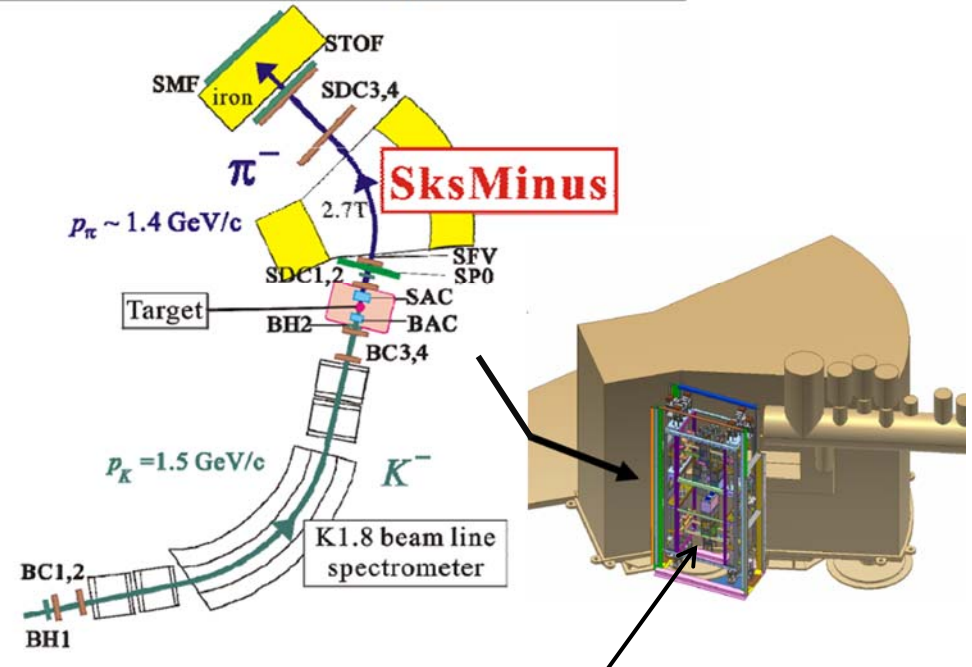
Some experiments and it's detectors

いくつかの実験及び検出器

J-PARC での実験



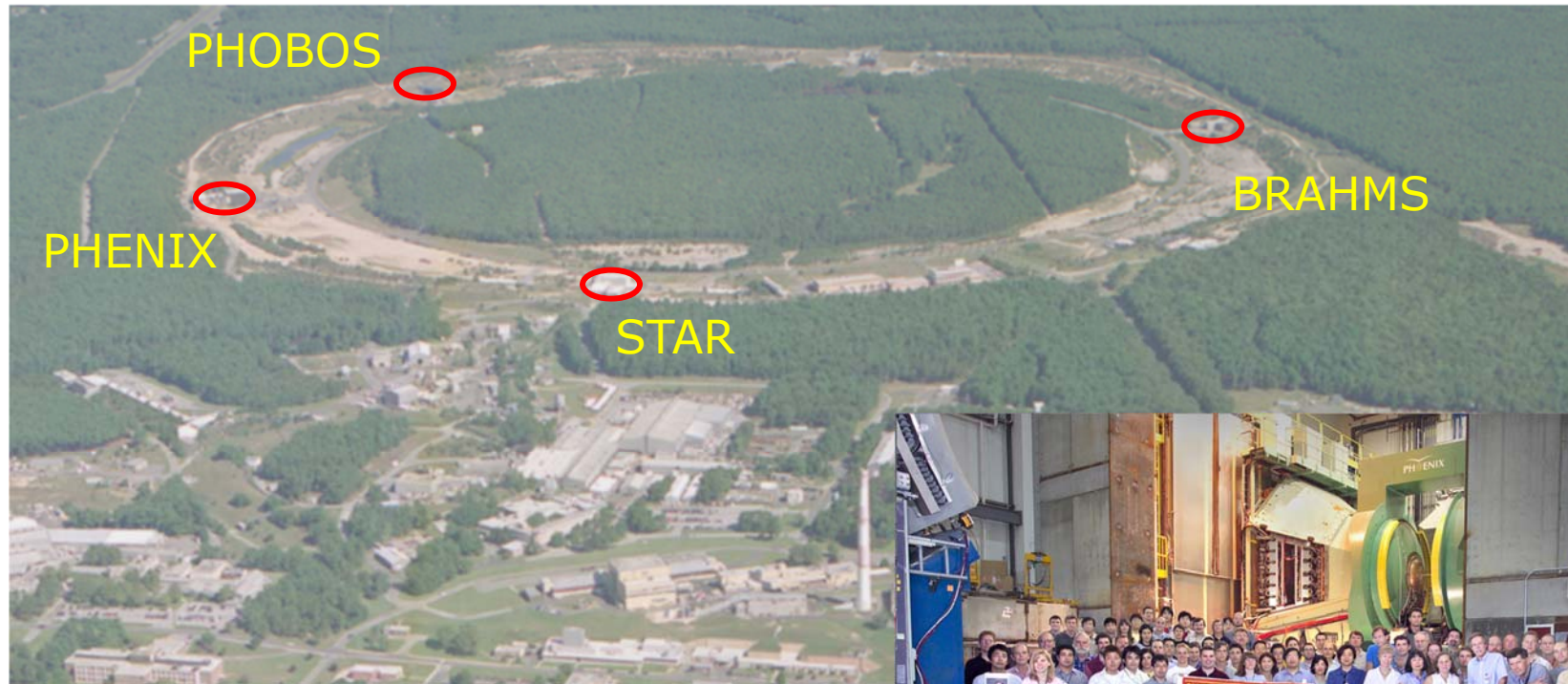
(K^-, π^-) reaction @ $p_K = 1.5 \text{ GeV/c}$



Ge 半導体検出器群
 γ 線を非常に精度良く測定

- ハイパー核を生成して、その原子核のエネルギー状態を精密に調べることにより、核力の研究を行う
 - ハイパー核: sクォークを持つバリオン(核子の仲間)が入った状態の原子核

RHIC at BNL



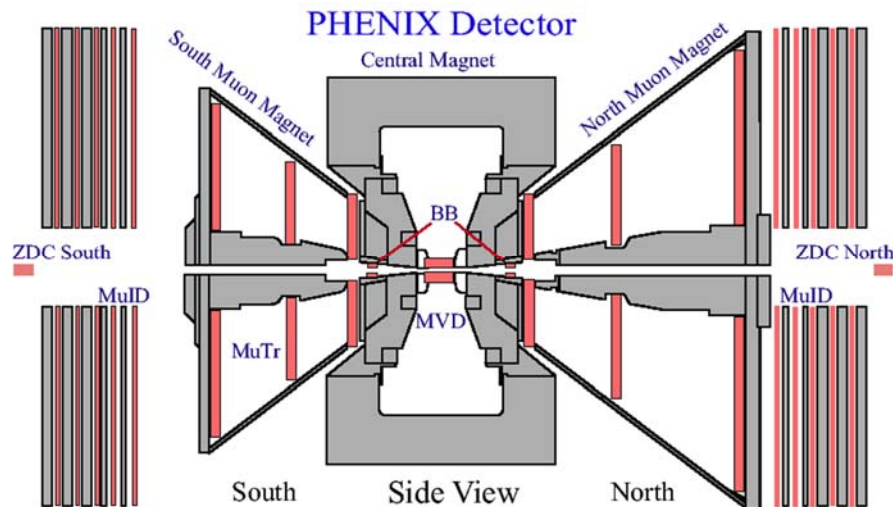
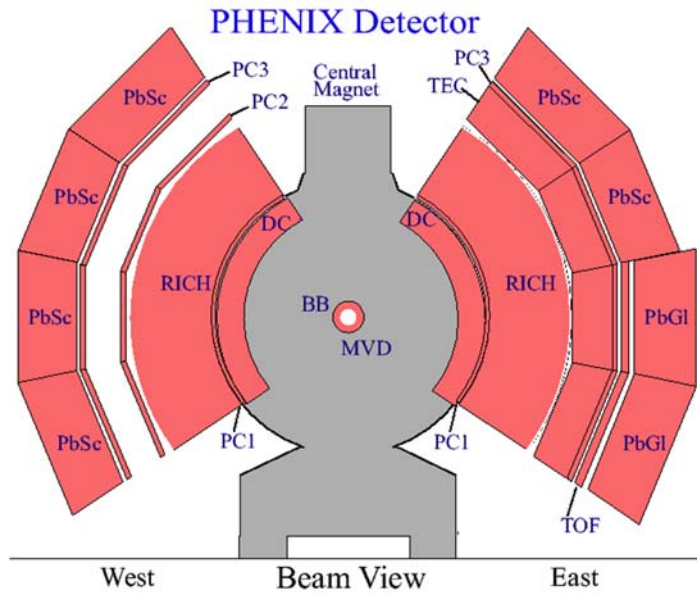
- Relativistic Heavy Ion Collider
 - 最初の重イオン衝突型加速器
- 四つの実験
 - PHENIX, STAR
 - 400人以上
 - PHOBOS, BRAHMS
 - 40人程度



PHENIX 検出器とコラボレーター

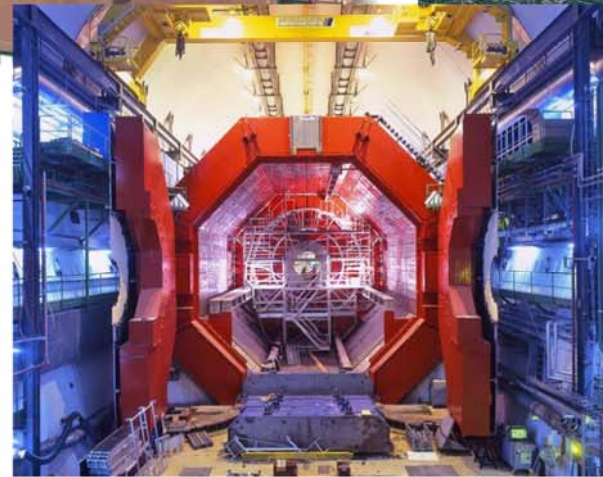
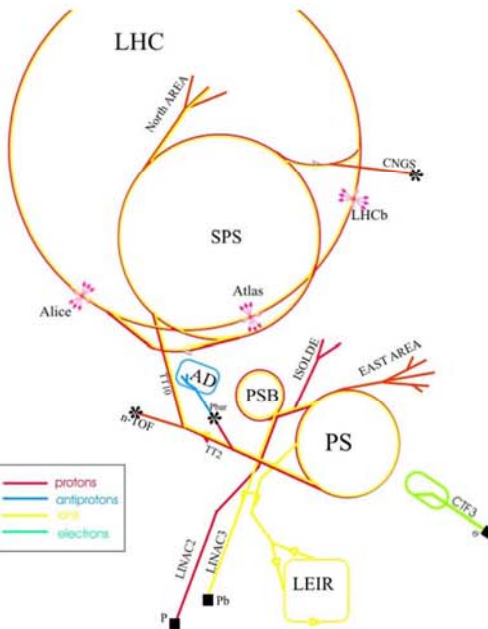
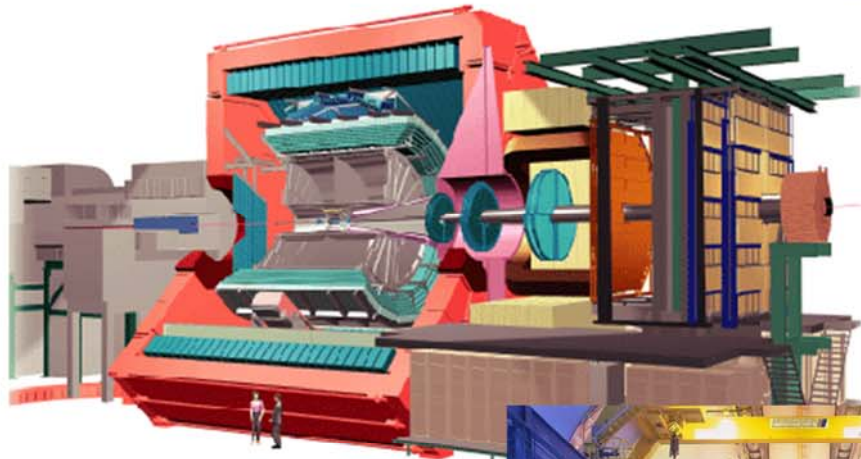


PHENIX実験



- 衝突点、中心衝突度
 - Beam-Beam Counters (BBC)
 - Zero Degree Calorimeters (ZDC)
- 荷電粒子の軌跡検出
 - Drift Chambers (DC)
 - Pad Chambers (PC1, PC2, PC3)
- π, K, ρ, d, \dots 飛行時間による粒子識別
 - Start timing from BBC
 - Stop timing from
 - High resolution TOF detectors (TOF)
 - TOF from Lead Scintillator EMCal (PbSc)
- 電子・陽電子の識別
 - Ring Image Cherenkov (RICH) detectors
 - EMCal (PbSc, PbGI)
- 光子 (π^0, η, \dots)
 - EMCal (PbSc, PbGI)
- ミューオン
 - Muon Tracker (MuTr)
 - Cathode-strip readout chamber
 - Muon Identifier (MuID)
 - Streamer (Iarocci) tube and steel

ALICE 実験

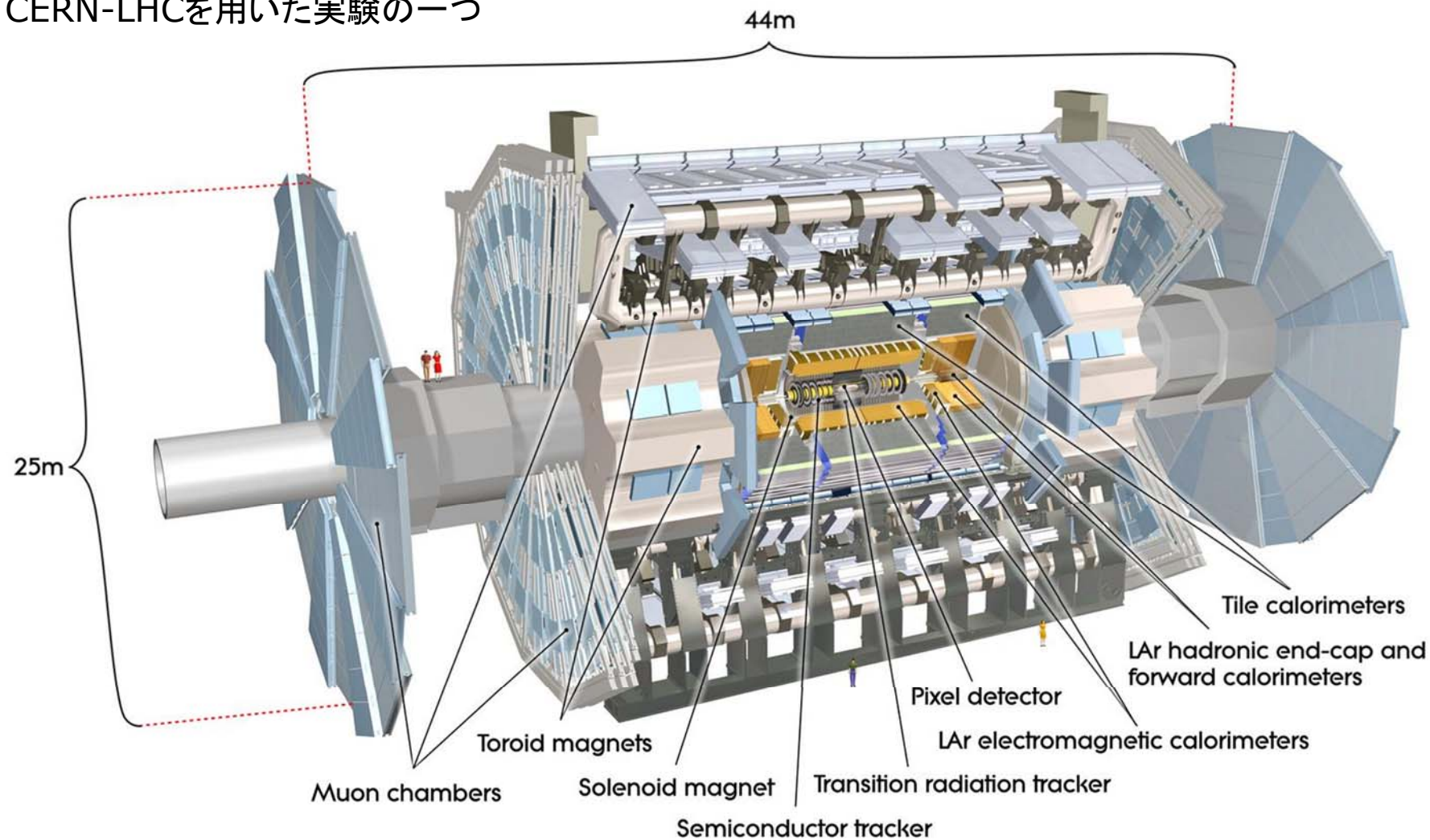


- CERN-LHCでのクォーク・グルーオン・プラズマに関する実験

- 高エネルギーの重イオン同士を衝突させる
- Higgs の発見をメインとするATLAS, CMS も研究を行うと表明している

ATLAS 実験

現時点で世界最大の素粒子実験用検出器
CERN-LHCを用いた実験の一つ



検出器のまとめ

- 測定したい粒子と物質との相互作用を利用
 - そのままではシグナルとしては弱いので、増幅させる工夫を行う
 - 検出器そのものに増幅作用があるように作る
 - 外部に電子回路を用意し処理させる
- 測定したい粒子＝測定した物理現象、にあわせて検出器を設計
 - 10人程度で出来る実験もあれば、2000人規模になる実験(ATLAS)もある
 - どんな巨大な検出器も一つ一つの要素は、粒子と物質との相互作用の原理を応用したもの



Application for the Engineering and Medical Fields

工学・医学分野への応用

工業利用

- タイヤの加工



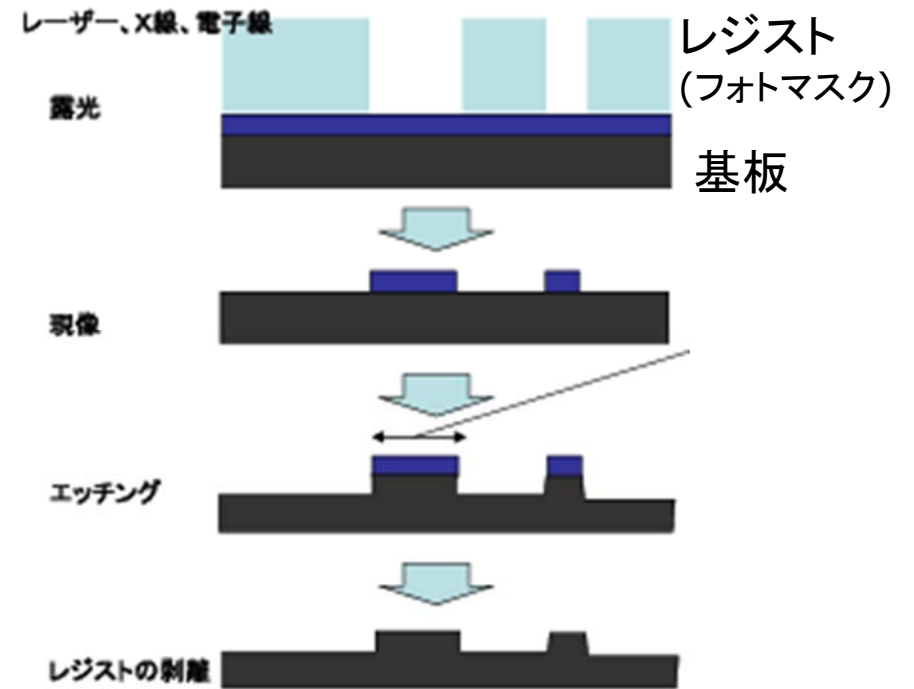
生ゴムは弱い。
放射線を当てて
網目上の構造
を作る。粘着性
を下げる

- ビニール・プラスチック加工



耐熱性を高める。
三味線や琴など
の弦用ナイロンの
音質改善

- 集積回路(半導体の加工)

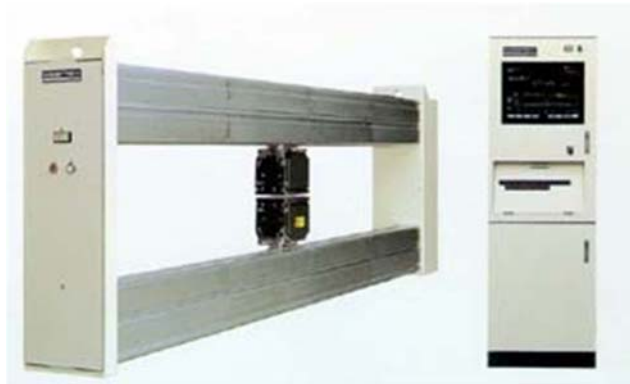


集積化

細い線を作るため、短波長の光
(X線)や電子線を用いる

工業利用

- 製品の厚さ検査



- リサイクル(排ガス処理)

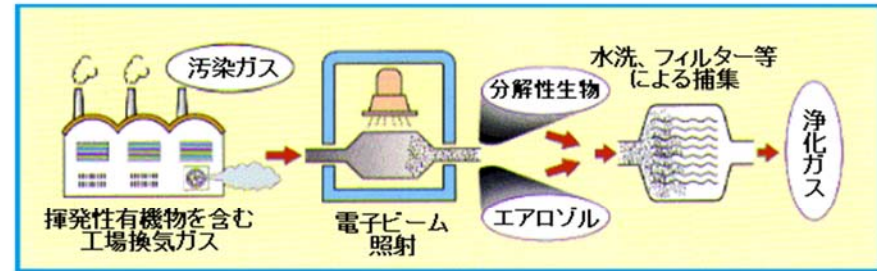


図5 換気ガス中の揮発性有機物の電子ビーム処理

[出典]電子ビームで換気ガスを浄化する FF No.36 p.3-4(1998年2月)

<http://www.jaeri.go.jp/genken/index.html>

- ガラスや宝石類の着色



ガラスの花 瓶

ガラス＋ナトリウム
＋放射線→茶色

ガラス＋コバルト
＋放射線→紫

工業利用

- 非破壊検査

溶接がうまくいったかどうか、使用している機材に故障や破損がないかどうかを確認する方法の1つ

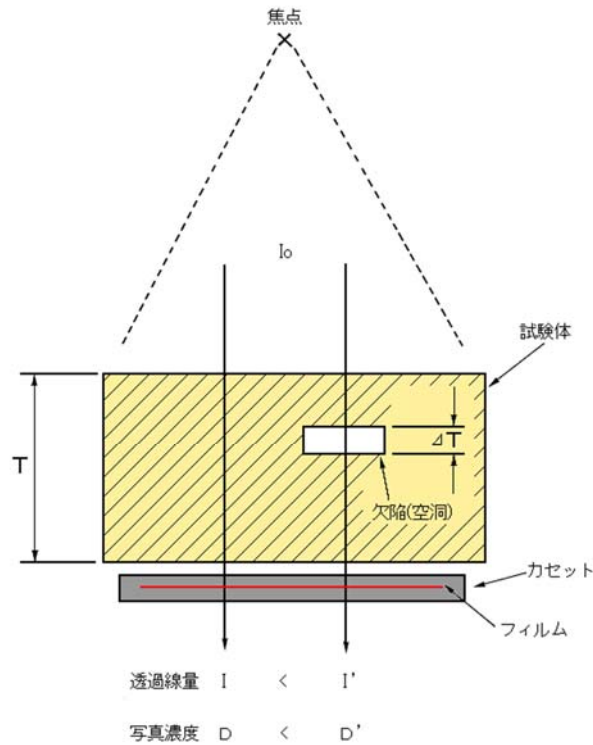
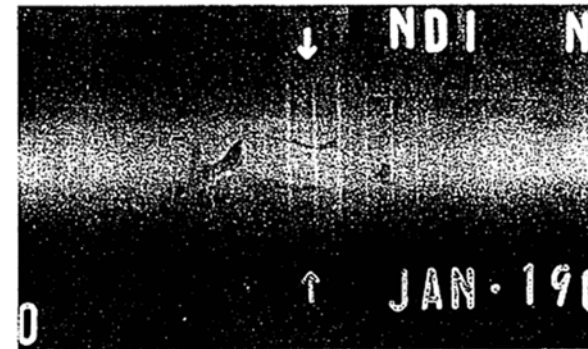
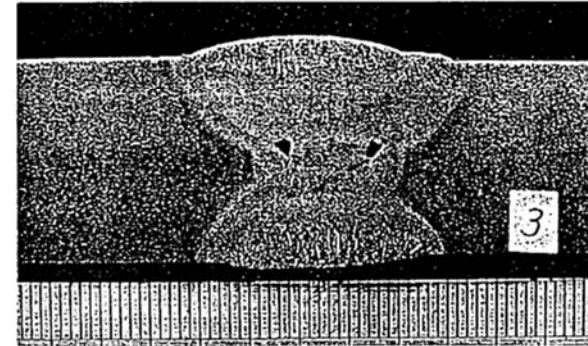


図2 欠陥検出の原理図



融合不足の透過写真



透過写真の矢印の部分の断面写真 $\times 2.1$

下段の断面写真では、中央部に黒点が2個見付き、融合不足で欠陥になっていることがわかる。

図5 ラジオグラフィ透過写真の例 (融合不足)

[出典]日本非破壊検査協会(発行):「溶接部の放射線透過試料写真集(1988)」

医療への利用

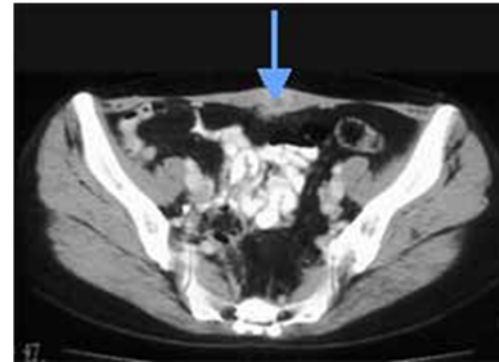
- 検診

- レントゲン(X線)



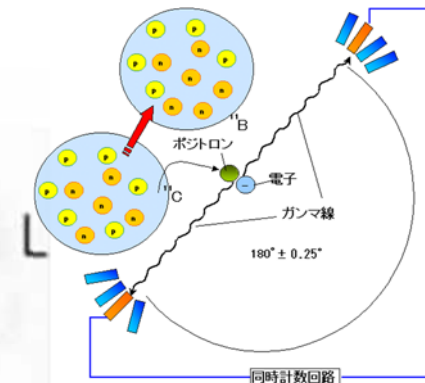
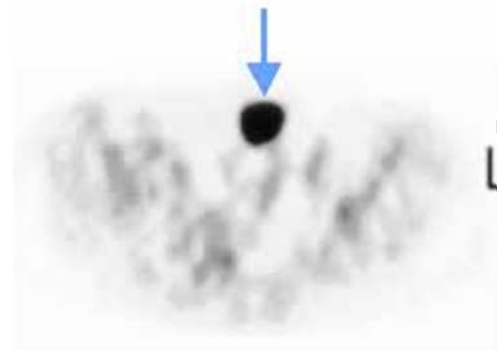
Mrs. レントゲンのX線写真

- X線CT



X線で物体を走査し、内部を輪切りにした画像を作る

- ポジトロンCT



陽電子を放出する放射性同位体(^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F 等)で標識化した薬剤を投与、薬剤の分布を陽電子の対消滅時に発生するガンマ線の測定で調べる

PET

- Positron emission tomography

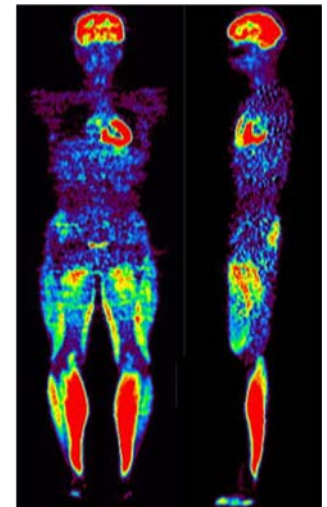
- 原理

- 不安定原子核が β^+ 崩壊を起こした際に陽電子が放出される
- 陽電子と電子が対消滅をし、 γ 線が二本逆方向にでる
- この γ 線を同時にとらえることで、どこから陽電子が出たか線が引ける
- 多数の線を重ねあわせることで立体的に画像を作成

- ガン細胞はどん欲

- 栄養や酸素を他の細胞よりもよく吸収する
- 不安定核を含む酸素や糖類を作成し、ガン細胞に吸収させる

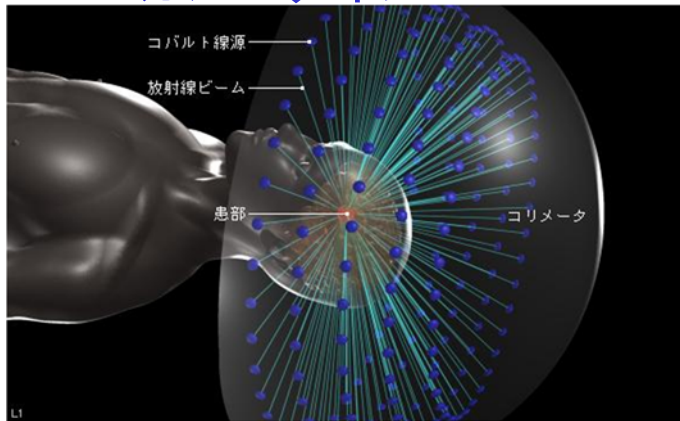
- 東北大学ではサイクロトロンRIセンターでPETを用いた研究が行われている



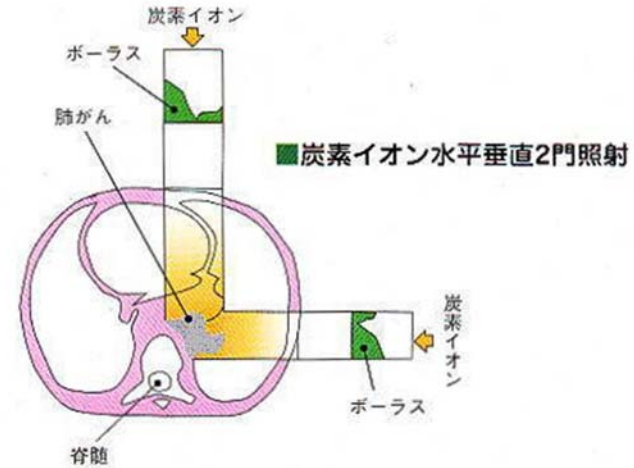
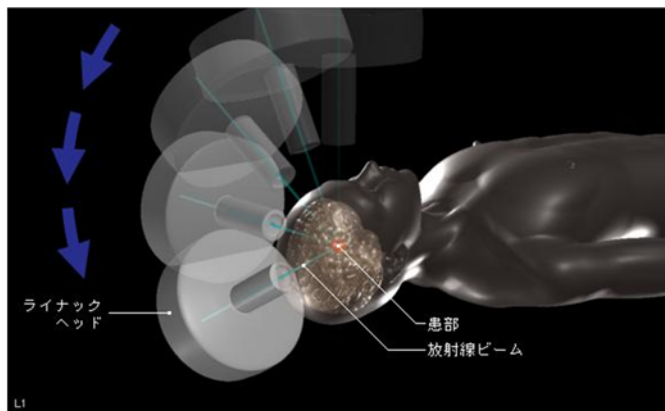
医療への利用

- 治療

- ガンマナイフ



- ライナック治療



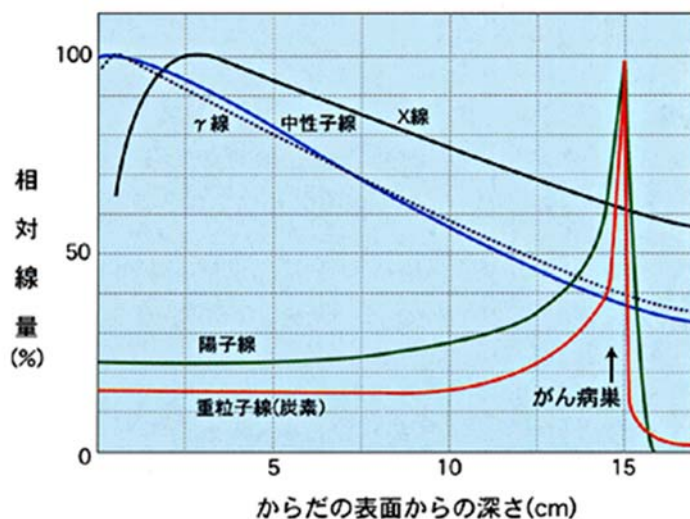
- 医療器具の殺菌

- 放射線殺菌: 殺菌剤等の残留のないクリーンな滅菌医療器具

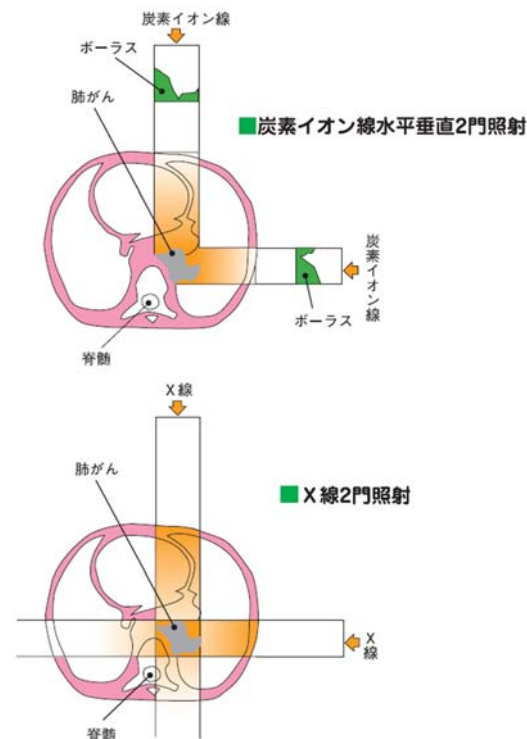


重粒子線治療

- 質量数の大きな重イオンは、物質と相互作用をして静止する直前に多くのエネルギーを落とす
 - 途中まではあまり相互作用をしない
 - 生体への影響がすくない
 - 粒子のエネルギーを調整することでどのくらいまで深く届くか調整可
 - 狙ったガン細胞だけたたくことが出来る



独立行政法人 放射線医学総合研究所制作のウェブページ
「重粒子線がん治療について知りたい方のために」より



農業利用

品種改良



●ガンマ線照射によって育成された黒斑病耐病性ニホンナシ3品種の果実('ゴールド二十世紀'(左上)、『寿新水』(右)、『おさゴールド』(左下))

Fruits of 3 Japanese pear cultivars resistant to black spot disease developed by γ -irradiation 'Gold Nijisseiki' (upper left), 'Kotobuki Shinsui' (right) and 'Osa Gold' (lower left)

図3 ガンマ線照射によって育成された黒斑病耐病性ニホンナシ3品種

[出典]北川健一ほか:ニホンナシ新品種「寿新水」、鳥取県園試報、3:1-13(1999)

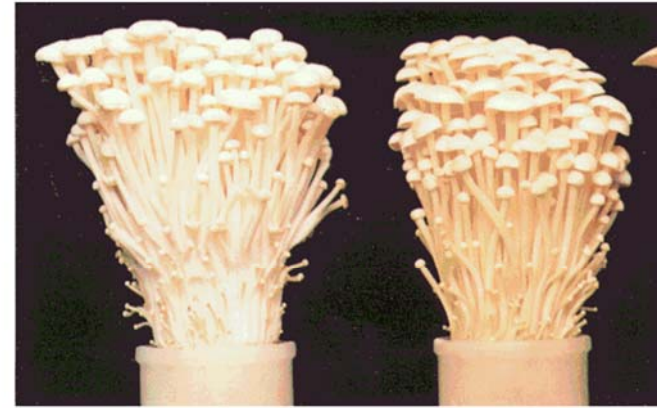


図4 放射線育種によって作られた純白系エノキダケ「臥竜1号」(左)

[出典]農林水産省 放射線育種場(パンフレット)、p.5



放射線育種によって作られたいろいろな花色の菊(真中の菊から生まれた兄弟)

農業利用

発芽防止

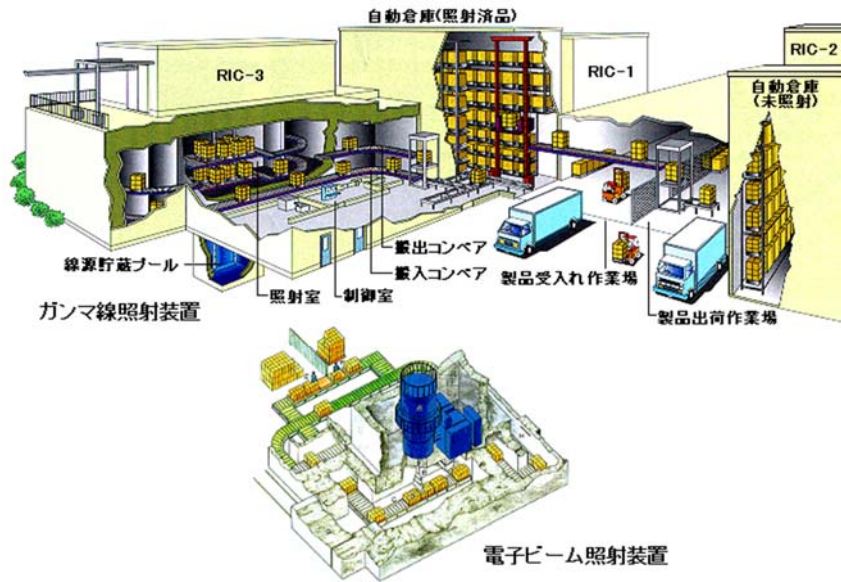


図3 ガンマ線照射装置と電子線照射装置

【出典】ラジエ工業株式会社：ラジエ工業の放射線照射サービスのご案内、パンフレット（1998年10月）

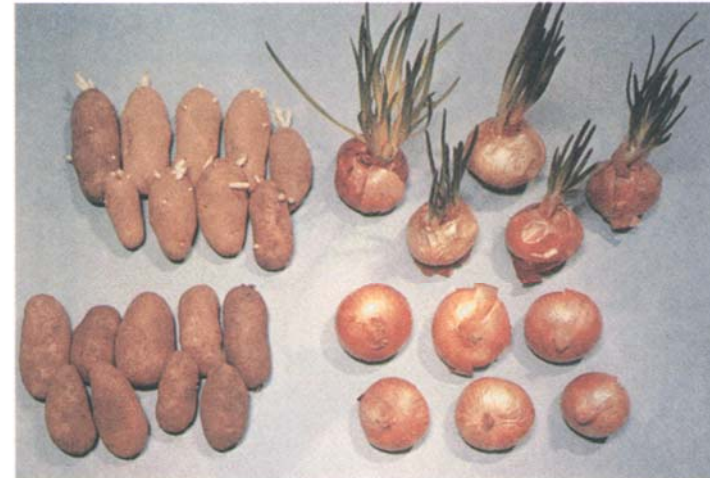


図1 放射線照射によって発芽防止されたジャガイモと玉ネギと、未照射により発芽したもの

【出典】日本原燃株式会社（編）：放射線と原子燃料サイクルのはなし、パンフレット、p7



図4 北海道士幌農協のジャガイモ照射施設の内部

【出典】ホクレン農業協同組合連合会、北海道士幌町農業協同組合：ガンマ線照射による芽止めじゃがいもについて、北海道士幌町農業協同組合

農業利用

● 害虫駆除

- 農薬散布: 環境に悪影響
- 放射線で害虫の不妊化 → 散布: 根絶、予防的防除
 - ex. ウリミバエ, ラセンウジバエ, ツエツエバエ

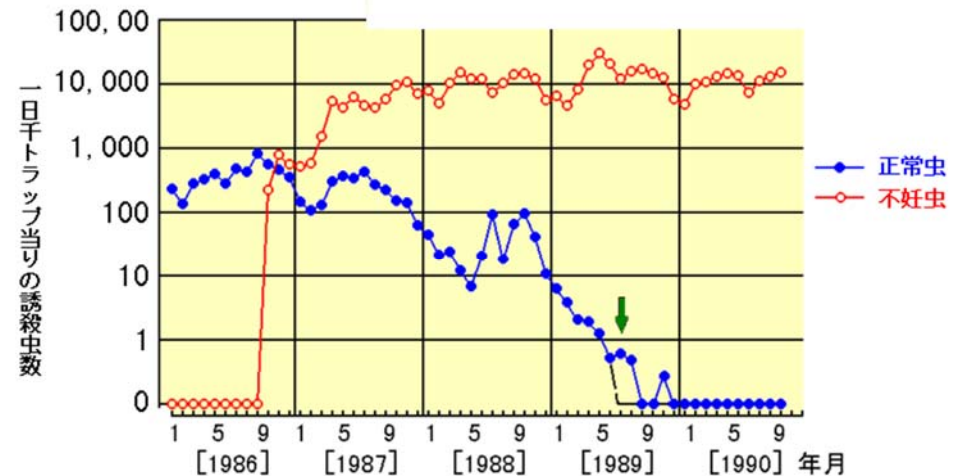
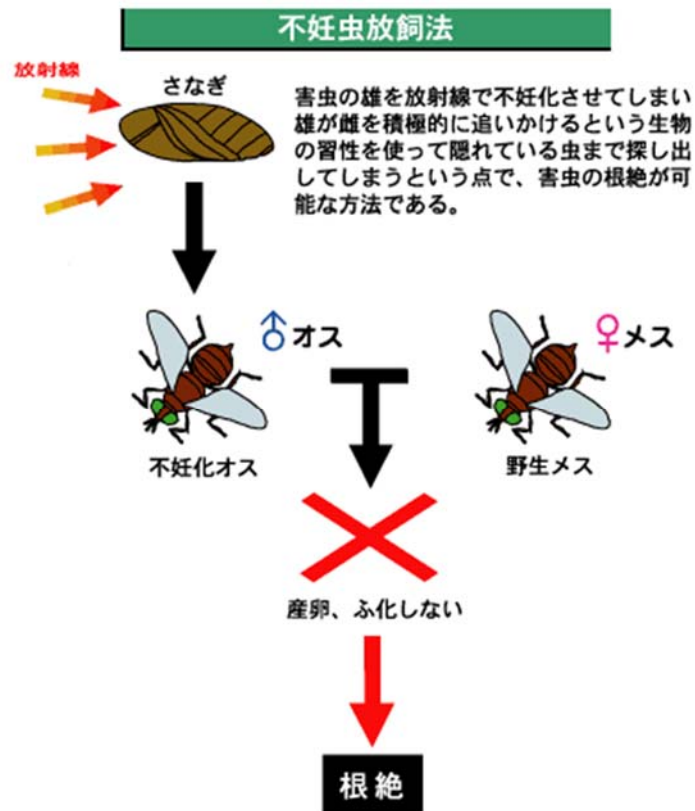


図2 沖縄群島におけるウリミバエ根絶の経過

[出典] 垣花廣幸: 不妊虫放飼法によるウリミバエの根絶、放射線と産業、No.51, 33(1991)

放射線の利用に関するまとめ

- 物質との相互作用を利用
 - 画像診断・構造検査
 - ガン治療
 - 遺伝子へ影響を利用した品種改良
- 利用にあたっては物理現象をきちんと理解する必要がある
 - リスク管理
 - 放射線は測定可能な物理現象
 - 不必要に恐れる必要はない
 - 確率的事象の理解
 - 素粒子・原子核分野の基礎知識が必要
 - 医学分野での放射線の利用に関して、物理の専門教育を受けた人材の活用が必要とされている