

2024年度：宇宙線と素粒子の実験 (ミュー粒子実験)

- 担当教員：
 - 藏重久弥 自然3号館 318室, 内線5638
- TA：
 - 水引 (粒子物理学研究室 M1)

テキスト、p.10の流れに沿って進めます。

課題： スライドp.23までに1人1つ以上、質問してください。

目的

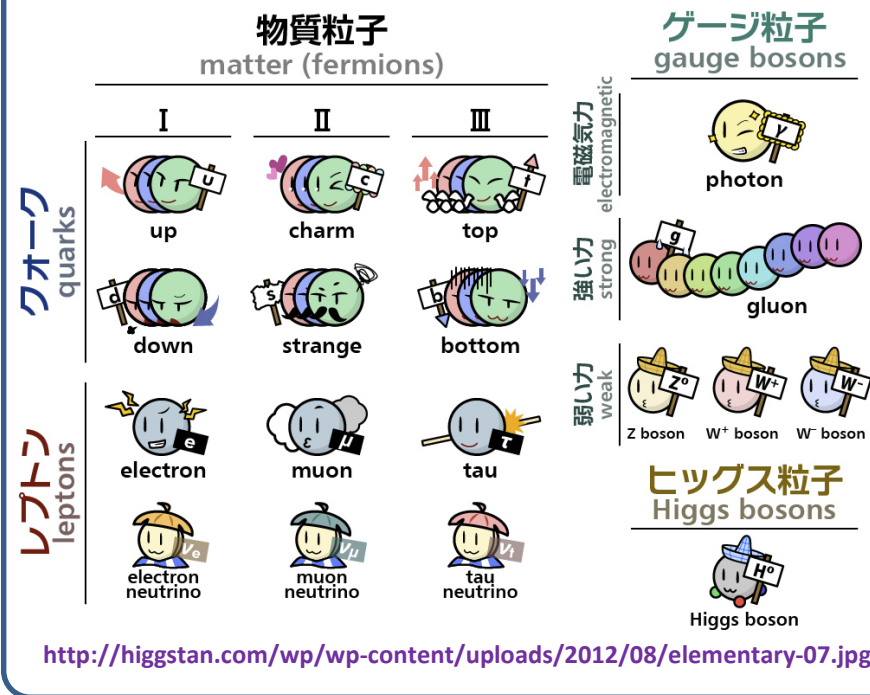
- ミュー(μ)粒子を題材に、**素粒子実験の基礎**を学ぶ
 - 粒子の「崩壊」、弱い相互作用、、、
- 本実験で行う事は以下。
 1. μ 粒子の寿命を測定する。
 2. 宇宙線 μ 粒子のフラックスを測定する。
 3. μ 粒子の最小電離作用を利用してプラスチックシンレータ検出器のエネルギー較正を行う。
また、エネルギー分解能を求める。
 1. μ 粒子崩壊での放出電子(放出陽電子)のエネルギー分布を測定し、理論計算と比較する。

素粒子と宇宙の概観

素粒子物理学(実験)とは？

- 身の回りの世界の**最も基本的な構造**を理解する
- 最小の基本構成物質(素粒子)
- どのような力(相互作用)
- **素粒子の標準模型**があるが、**不完全**
- 1970年代に確立
- 謎: ニュートリノ、暗黒物質、...
- さらなる微細構造が存在??
 - 非常に高いエネルギーが必要
- **実験的手法で解明をめざす**
- 加速器で素粒子を作る
- 自然現象を精密に観測する

素粒子標準模型での基本粒子

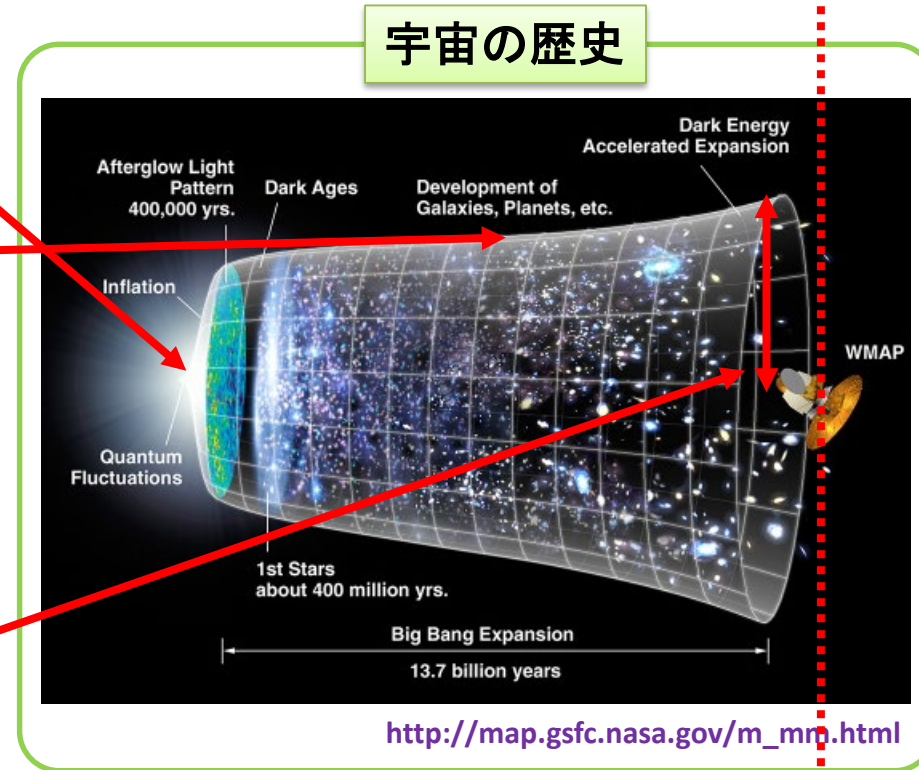


神戸大での主な
宇宙・素粒子実験



我々の理解している宇宙は...

- **138億年前**に誕生した
 - ビッグバン
- **(加速)膨張**している
 - 約70億年前から、膨張速度が増加
 - 「**暗黒エネルギー**」が原因？
- **観測可能な宇宙の大きさは、約14Gpc (465億光年)**
 - 空間が膨張しているため
- **ほぼ無限に広がっている？**
 - **インフレーション理論(未確認)**では、観測可能な範囲をはるかに超えて宇宙が広がっていると予測されている。



宇宙観測と素粒子物理学

■ 標準宇宙模型がほぼ確立

- インフレーション+ビッグバン
- 宇宙の初期 = 非常に高温
- 素粒子の**標準模型**を超える世界。
加速器では未到達。

■ 初期宇宙での物理法則の痕跡があるはず

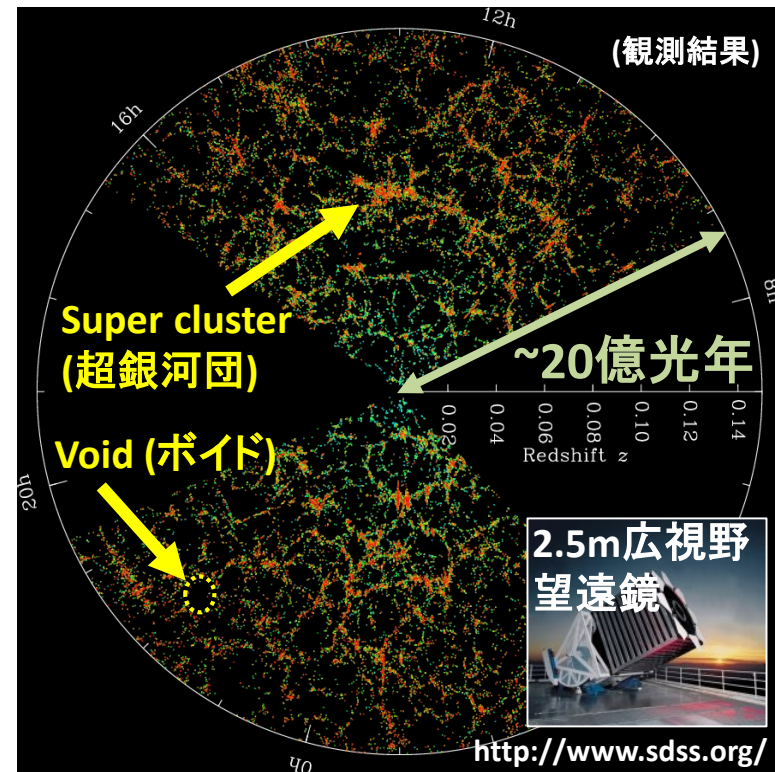
- 例: 宇宙の大規模構造

■ 物質・反物質の割合なども未解決

- なぜ宇宙には「物質」が多くて、「反物質」が少ない？

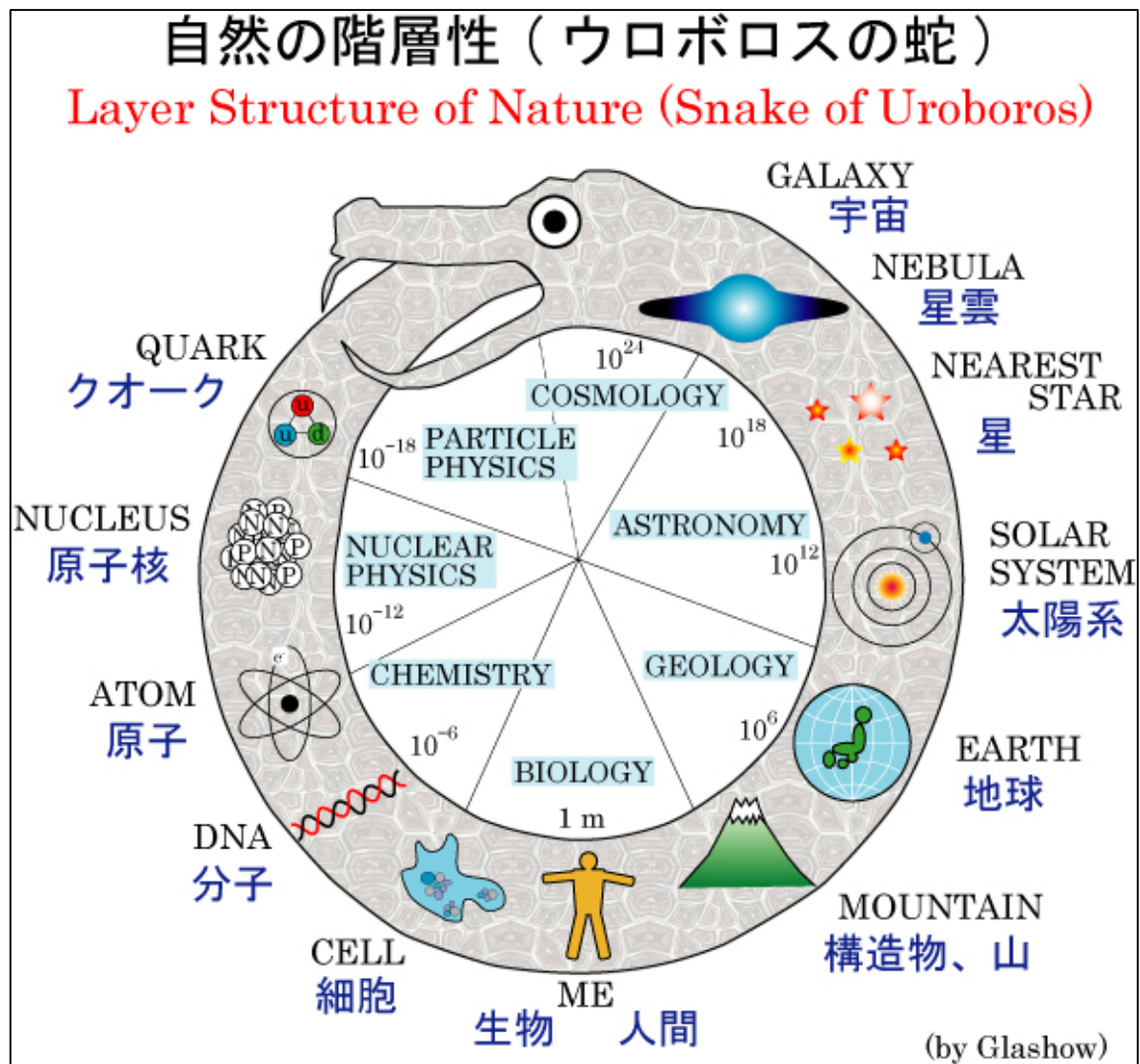
■ 「暗黒物質(ダークマター)」は、未発見の素粒子か？

■ 「暗黒(ダーク)エネルギー」の理論的説明は？



素粒子と宇宙の概観まとめ

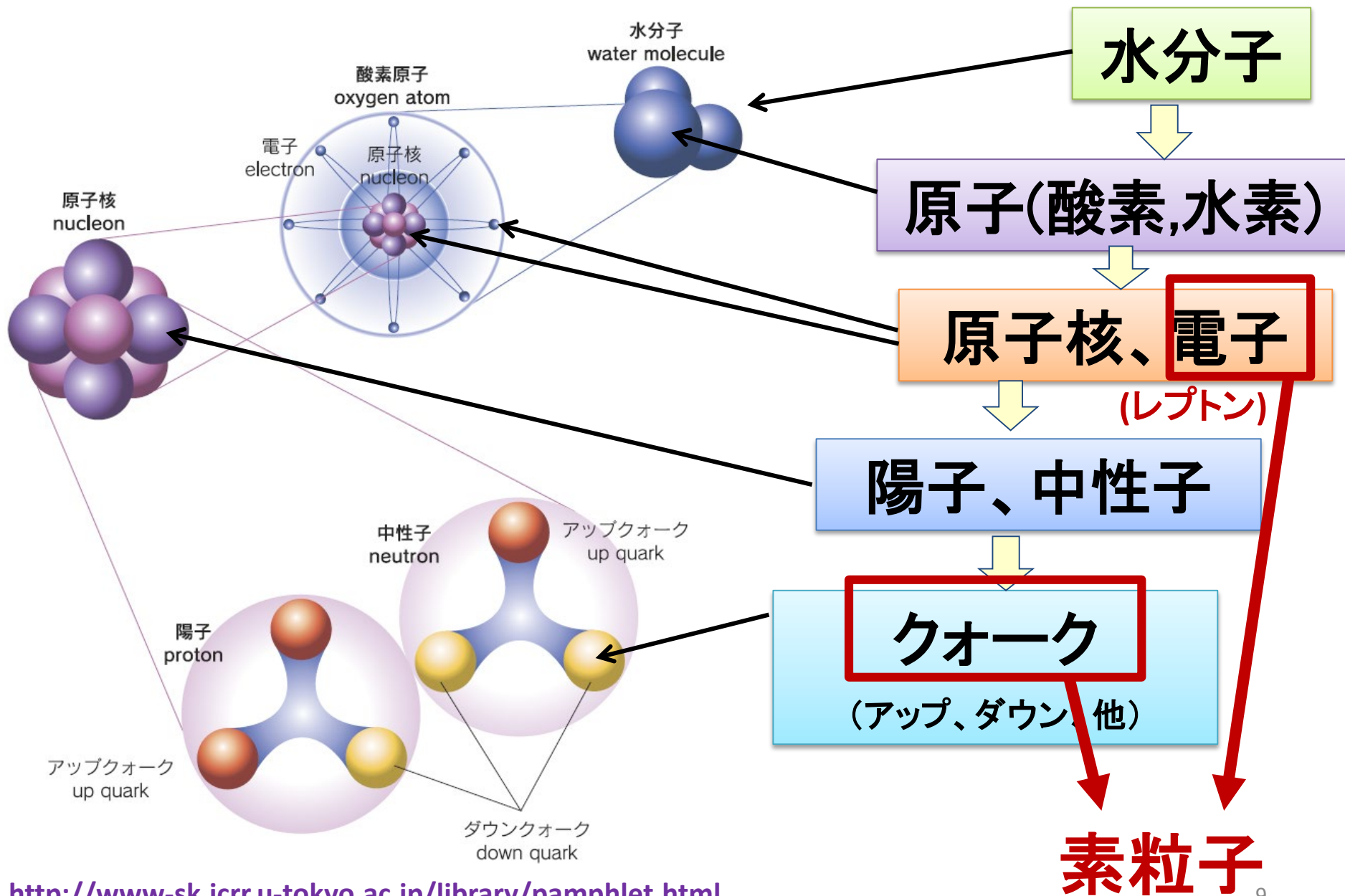
- 素粒子(=最小の基本構成物質)には標準理論が存在
- 高いエネルギー領域で、さらなる微細構造？
- 宇宙膨張→過去は1点に集中、非常に高温。
- 原始宇宙 = 素粒子標準模型を超えた物理で記述



素粒子標準模型の概観

現在の素粒子描像

水を拡大していくと...



素粒子標準模型での基本粒子

物質

物質粒子
matter (fermions)

反粒子も存在

力

クォーク
quarks

レプトン
leptons

原子



up



down



electron



electron neutrino



charm



strange



muon



muon neutrino



top



bottom



tau



tau neutrino

ミュー粒子

ニュートリノ

ゲージ粒子
gauge bosons

光



photon



gluon



Z boson

W⁺ boson

W⁻ boson

電磁気力
electromagnetic

強い力
strong

弱い力
weak

ヒッグス粒子
Higgs bosons



Higgs boson

質量

素粒子標準模型の概観まとめ

■ 基本的な素粒子

- 物質を構成(クォーク、レプトン、12種類(+反粒子))
 - ニュートリノを含む(3種類、質量ゼロ)
- 力を伝える(光子、他)
- 質量を生み出す(ヒッグス粒子)

■ 標準模型での相互作用は3種類(+重力)

- 強い力、弱い力、電磁気力、(重力)

■ 1970年代からほとんど全ての素粒子実験の結果を説明してきた。

■ 大統一理論、究極の理論は未完成

- 標準模型を「超えた」実験的証拠が必要
- ニュートリノ振動、宇宙暗黒物質、が数少ない証拠

A photograph taken from space showing several astronauts in white suits holding long, thin, green, brush-like objects. The objects are suspended in the air, and the Earth's horizon is visible in the background. The text "宇宙線ミュー粒子の生成" is overlaid on the image in yellow, underlined characters.

宇宙線ミュー粒子の生成

宇宙線とは？ (cosmic ray)

- 地球外から飛来する粒子(一次宇宙線)
 - 90%が水素原子核(陽子)
 - 大気中の窒素原子核や酸素原子核等を破壊して二次宇宙線を生成
 - ミュー粒子やニュートリノも作られる
- 1秒間に1平方メートルあたり約1000個
- 典型的な宇宙線 μ 粒子のエネルギーは、**1~100 GeV**程度(解析で少し使うので覚えていてください)

単位の復習

■ エネルギー

- **eV 電子ボルト** $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J (W}\cdot\text{sec)}$
1つの電子を1ボルトの電位差分、動かす仕事
- $k=10^3$ 、 $M=10^6$ 、 $G=10^9$ 、 $T=10^{12}$ 、等をつける
- 加速器: $<\sim 10^{12}\text{eV}$
- 宇宙線: $<\sim 10^{20}\text{eV}$

■ 質量

- $1\text{eV}/c^2 = 1.78 \times 10^{-36}\text{kg}$
- 例: 電子 = $0.511\text{MeV}/c^2$ 、陽子 = $938\text{MeV}/c^2$ 、
トッブクォーク = $\sim 172\text{GeV}/c^2$ 、
($0.05\text{eV}/c^2 < \text{ニュートリノ} < 0.6\text{eV}/c^2$)

自然単位系: 光速(c)=1とする。
例: 電子の質量 = 0.511 MeV

パイ粒子の生成

$$p + n \rightarrow p + p + \pi^-$$

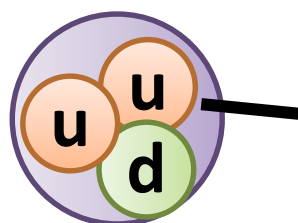
$$p + n \rightarrow p + n + \pi^0$$

$$p + n \rightarrow n + n + \pi^+$$

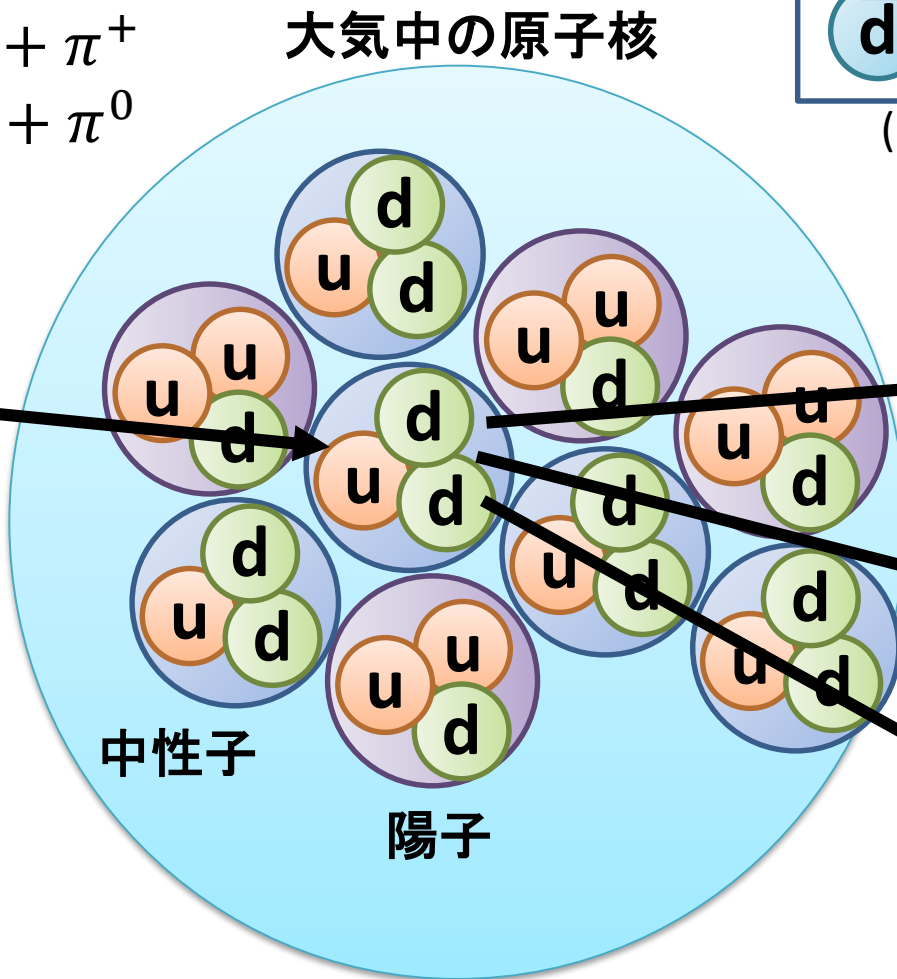
$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$$

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$

....



一次宇宙線
(陽子)



大気中の原子核

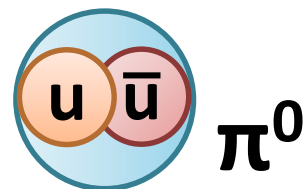
中性子

陽子

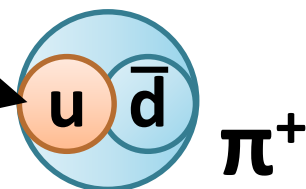
	アップ・クォーク
	ダウン・クォーク
	反アップ・クォーク
	反ダウン・クォーク

(クォークのカラーは省略)

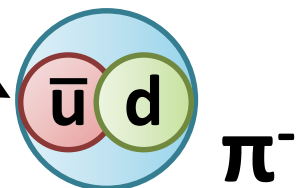
二次宇宙線



π^0



π^+



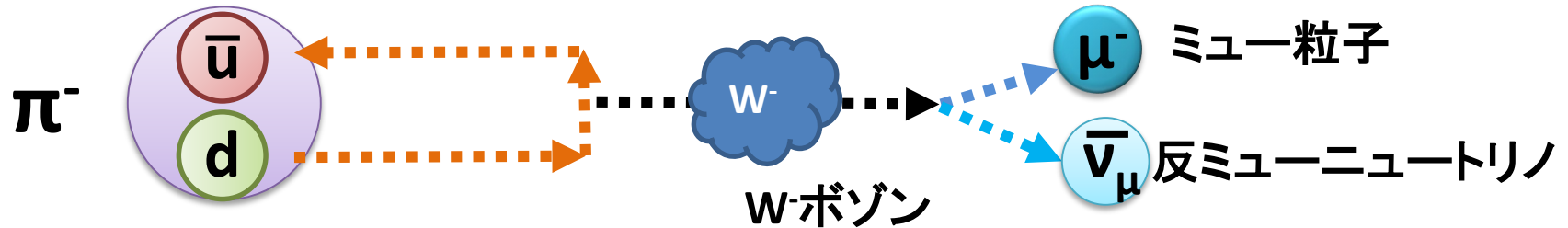
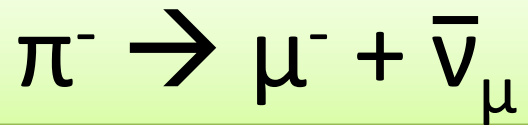
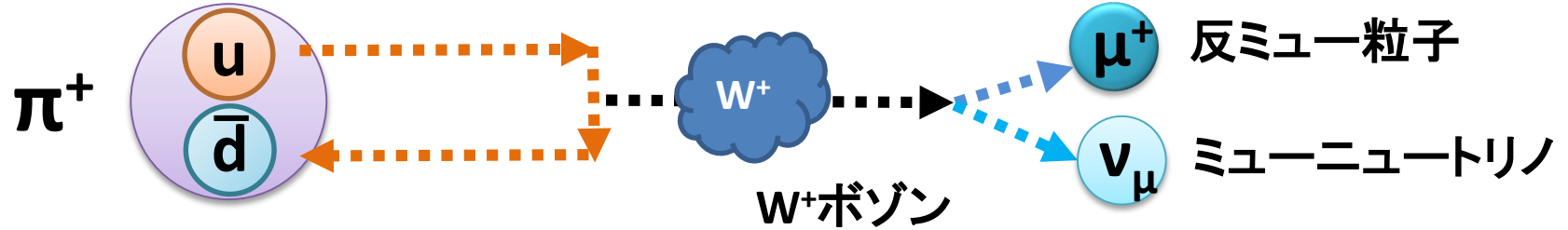
π^-

...

ミュー粒子の生成反応の例



u アップ・クォーク **\bar{d}** 反ダウン・クォーク



π 中間子の質量は $\sim 140 \text{ MeV}/c^2$ 。崩壊寿命は $\sim 26 \text{ nsec}$

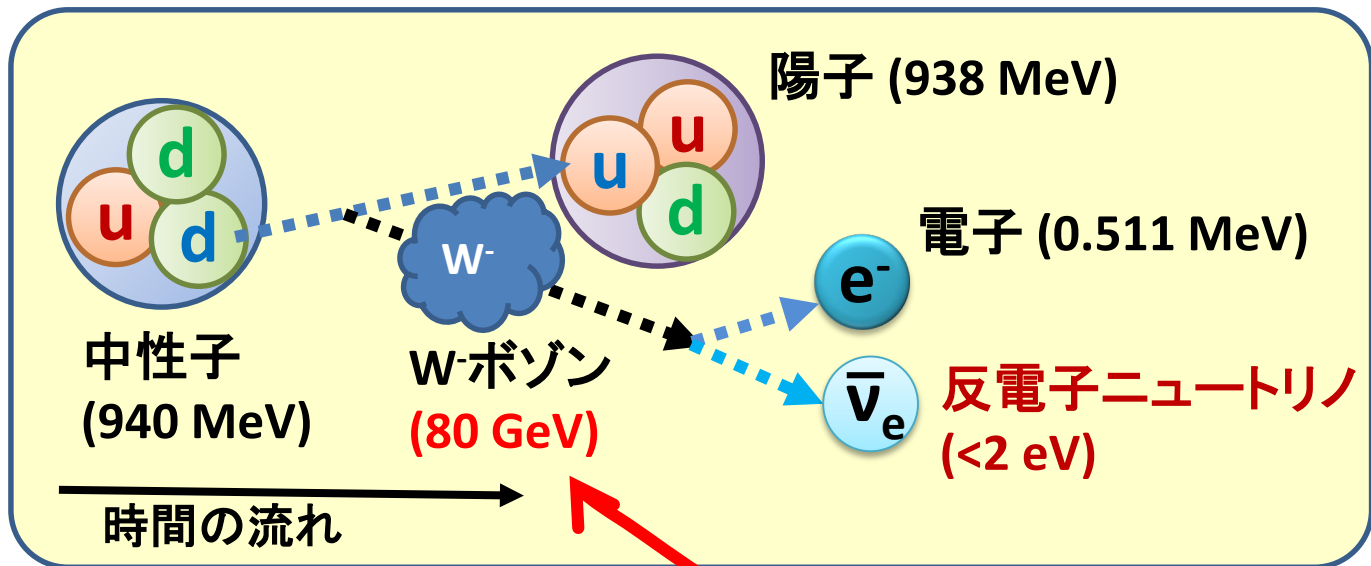
ミュー粒子の質量は $\sim 106 \text{ MeV}/c^2$

Wボゾンの質量は $\sim 80 \text{ GeV}/c^2$

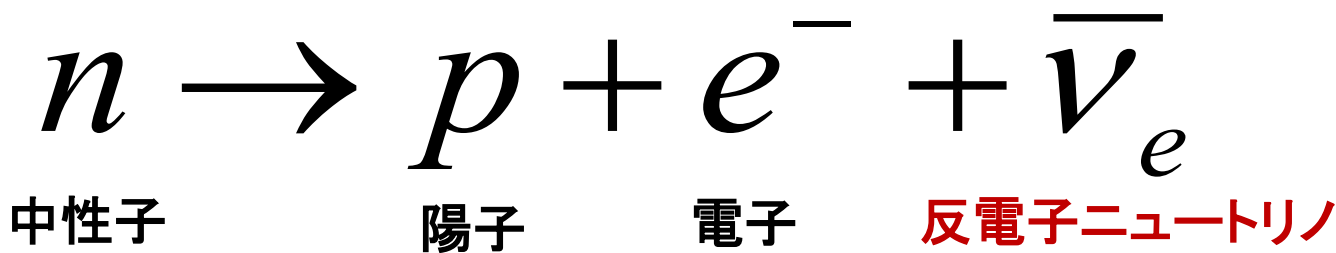
ミュー粒子の崩壊と弱い相互作用

ベータ崩壊（現在の理解）

クォーク、レプトン、ゲージ粒子での理解



反応式



不確定性原理より、
 $\Delta E \cdot \Delta t > \frac{\hbar}{2}$
 となると観測される

↓

しかし、エネルギー非保存が観測されたことは無い

↓

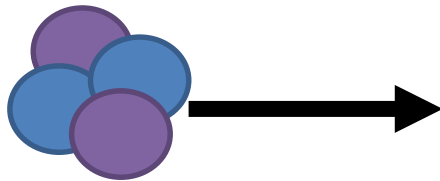
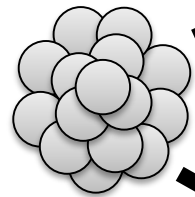
つまり、Wが存在できるのは、
 $\Delta E \cdot \Delta t < \frac{\hbar}{2}$
 のみ。(非常に短い時間)

ベータ線の発見

- 1898年頃：ウランやトリウムから透過力の異なる放射線がでていることを発見（ラザフォード）
 - 透過力： 低い→アルファ線、 高い→ベータ線

アルファ線（ヘリウム原子核、陽子2個、中性子2個）

ウラン



ベータ線（電子）



紙1枚

厚さ1mmの
アルミ板

ベータ線が出る原子核の崩壊=ベータ崩壊

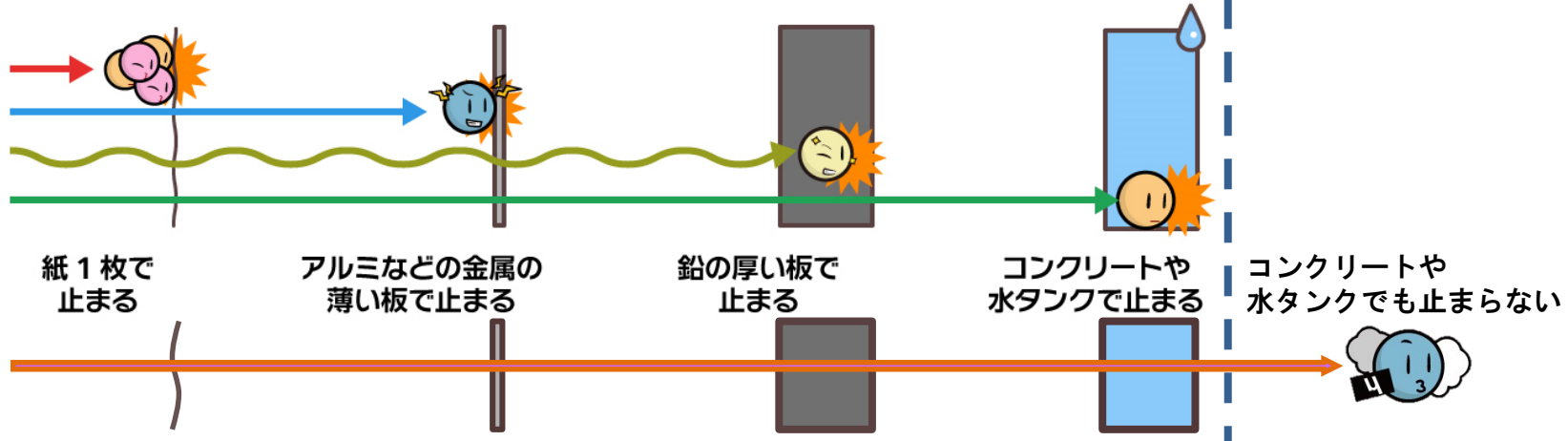
放射線の種類



止める物質に
エネルギーを
与える力

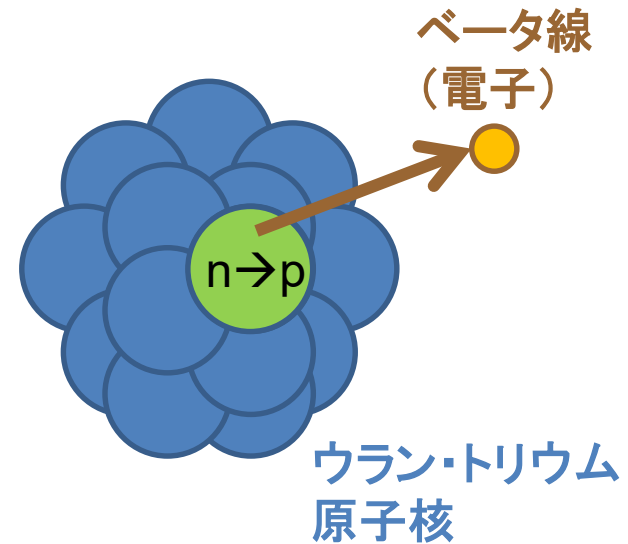


透過する力



ベータ崩壊の問題点？

- 観測されるのは、ウランやトリウムから電子が飛び出す現象
- ウラン・トリウムの原子核は電子と比べて非常に重い。
 - ウラン、トリウム：約230個の核子(=陽子・中性子)
 - 核子：電子の約1800倍の重さ
 - (滑らかな床上の)2トンの車から、10円玉を投げる
- 同じ反応なら、電子のエネルギーは常に一定のはずだが、、、
- 観測された電子のエネルギーは、ばらばら

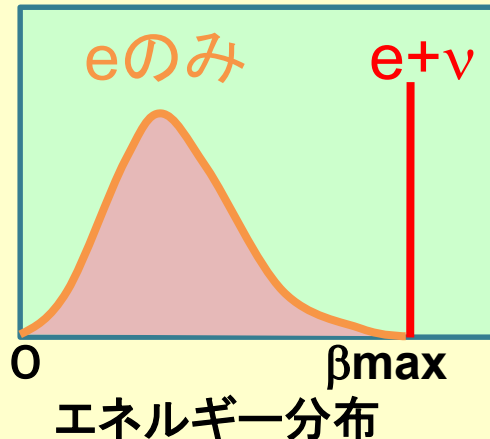
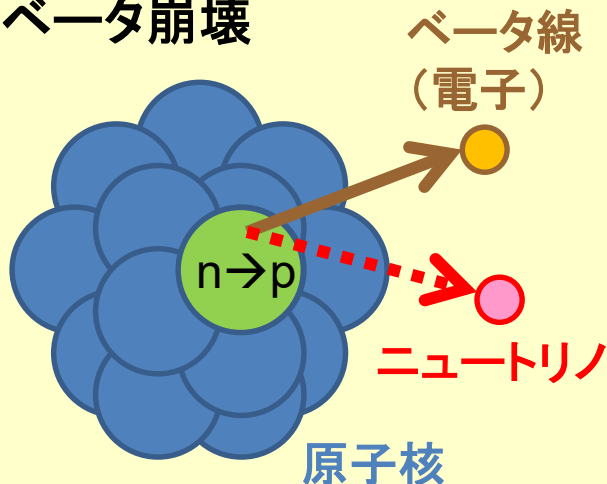


→ エネルギー保存則が成り立っていない??

ニュートリノの登場

- 1930年 ニュートリノ仮説 (パウリ)
 - ベータ崩壊のエネルギー保存則を満たすために「中性粒子」を提案。
- 1934年 ベータ崩壊の理論 (フェルミ)
 - 原子核内の中性子(n)が陽子(p)、電子(e)、**「ニュートリノ(ν)」**に崩壊する理論を構築した。

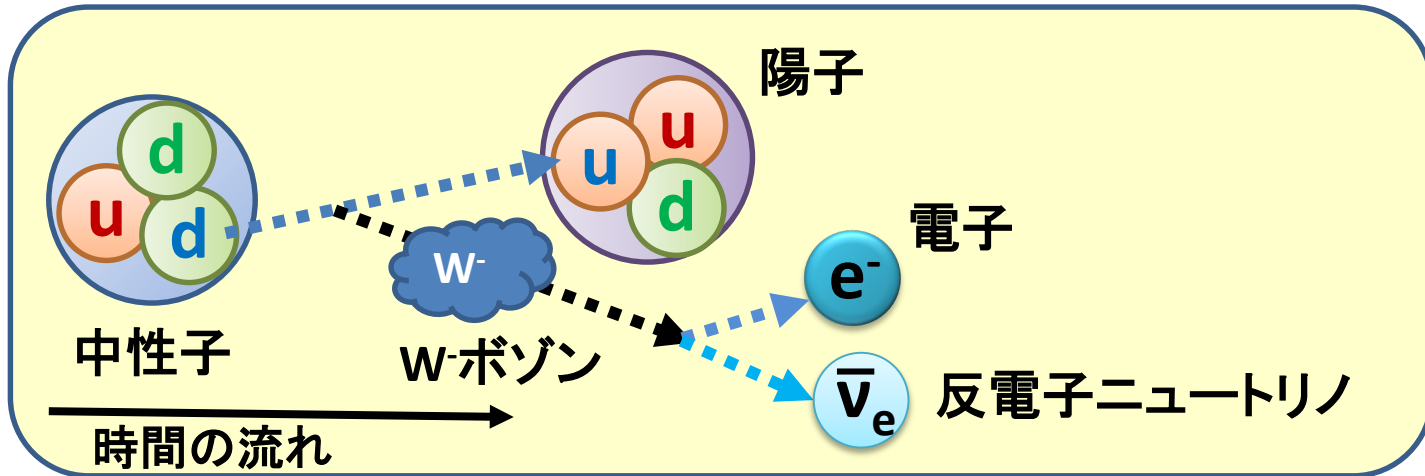
ベータ崩壊



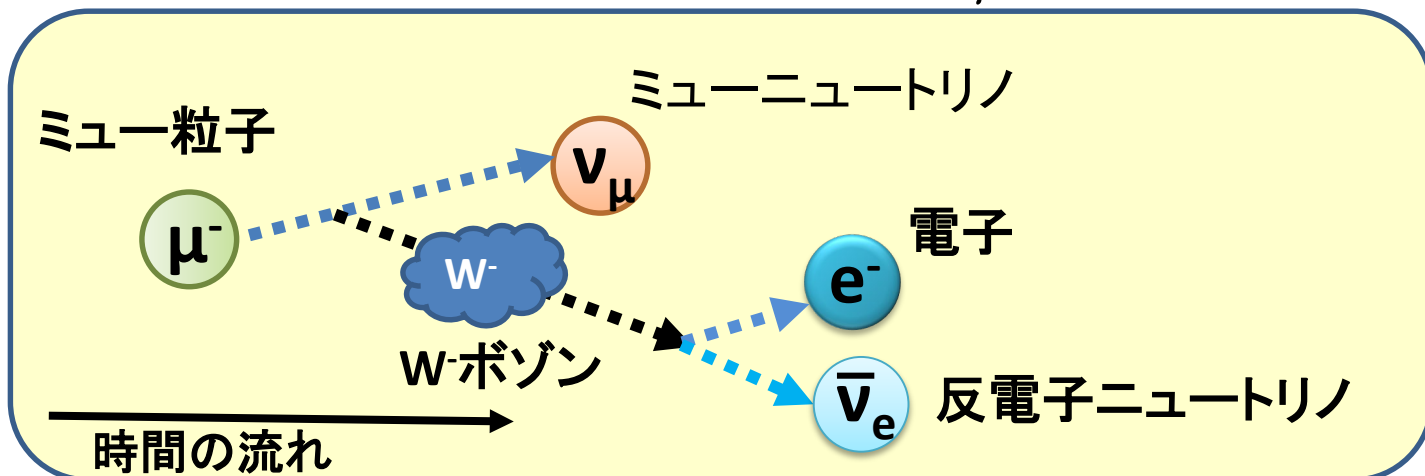
- 原子核から出てきたベータ線(電子)のエネルギーが広がっていた。
- 観測されない粒子(ニュートリノ)を考え、電子とニュートリノのエネルギーの和は一定と考えた。

ミュー粒子の崩壊

■ ベータ崩壊 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



■ ミュー粒子の崩壊 $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$



課題： スライドp.23までに1人1つ以上、
質問してください。

→まだの人、質問お願いします。

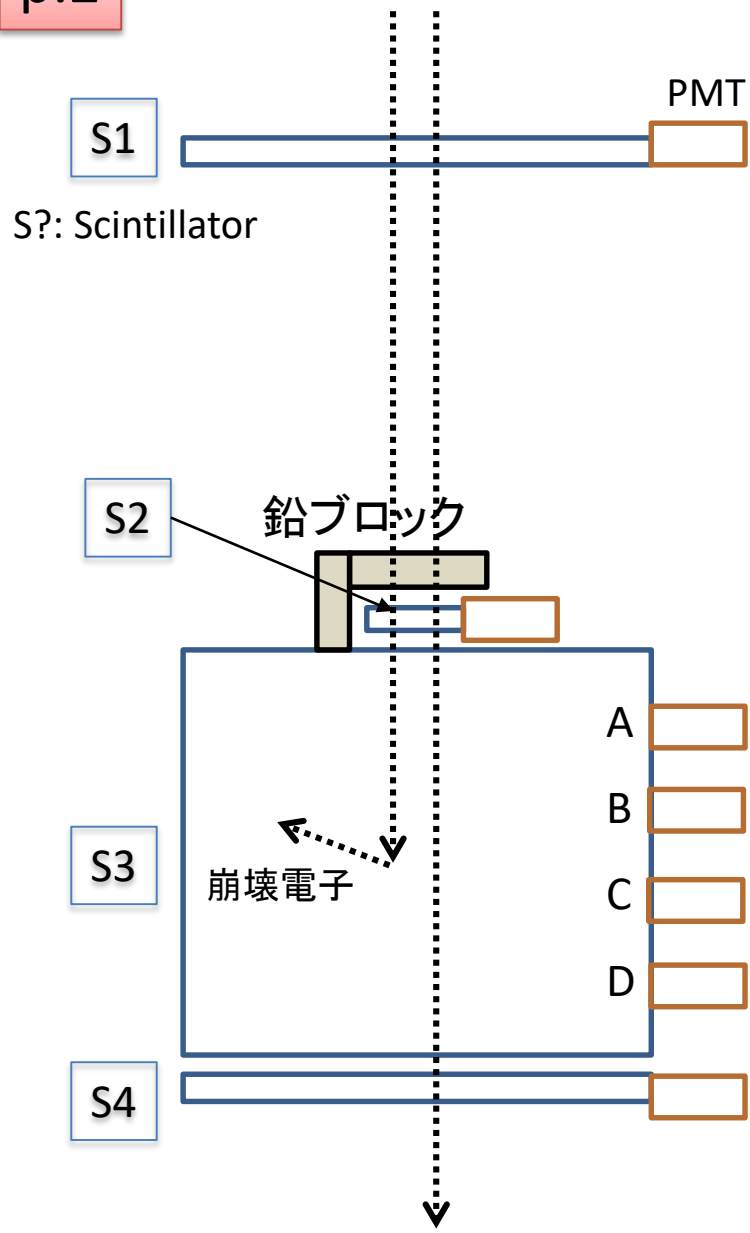
装置の説明

各装置のはたらき

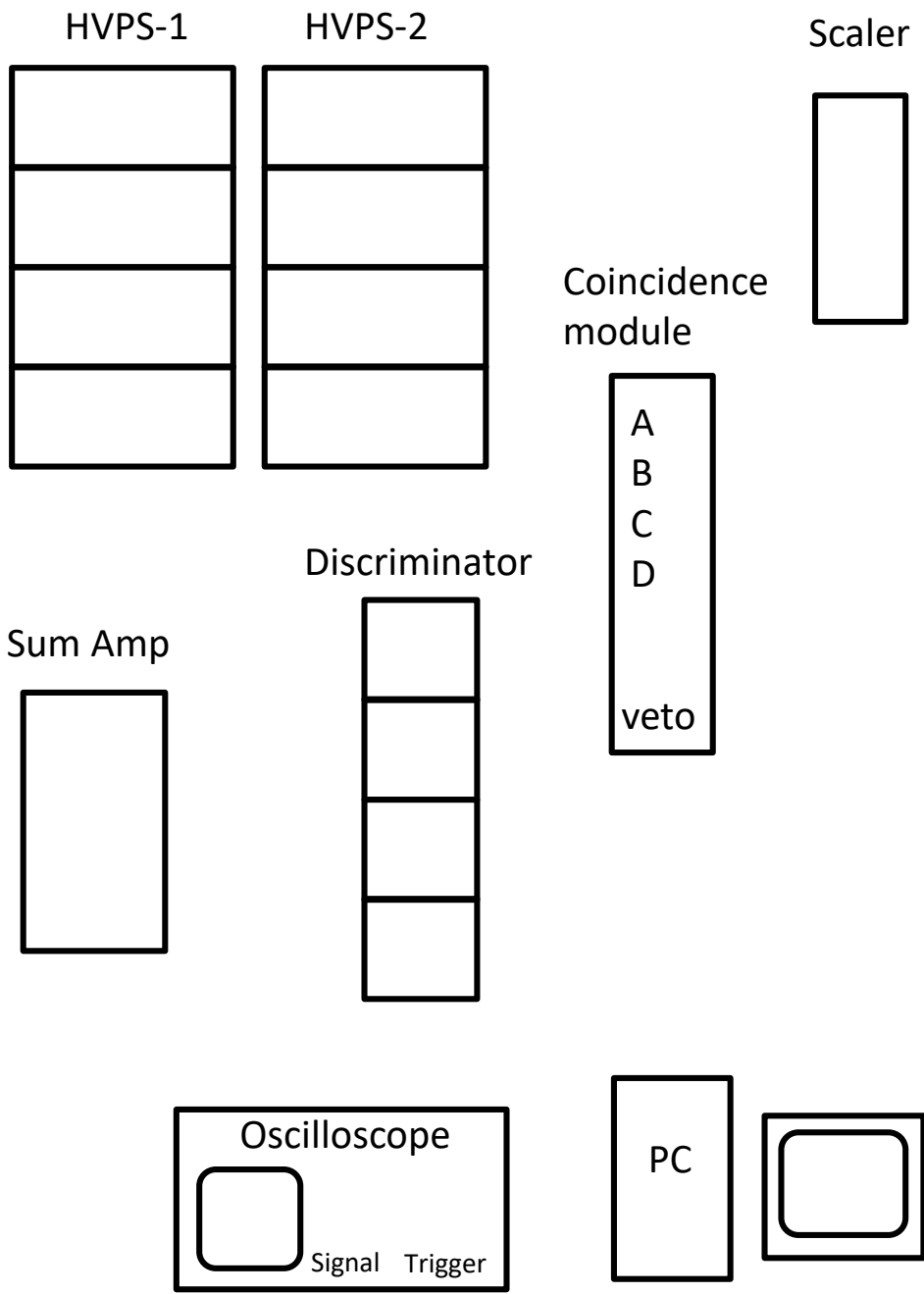
- 以下の装置(2年生で使用したはず)のはたらきを思い出してみよう。
- シンチレータ (S1,S2,S3,S4)
- 光電子増倍管(PMT)
- ディスクリ
- コインシデンス
- スケーラー
- オシロスコープ
- サムアンプ:アナログ信号を足し合わせて出力(今回初めて使用)

p.2

宇宙線ミュー粒子





S?: Scintillator



配線、電圧設定値等、記入下さい。

Scintillator

- シンチレーターとは、
電離・励起した電子が再び原子・分子の基底状態に戻るときに光を発する物質
- Organic Scintillator: 有機シンチレーター
 - Pure organic
 - Liquid
 - Plastic 
 - Fiber
- Inorganic Scintillator: 無機シンチレーター
 - Doped crystal 
 - Pure crystal

Organic Scintillator

- 有機シンチレーターは、主成分としてベンゼン環をもつ物質
ベンゼン環の結合:

平面内軌道をもつ σ 電子軌道
環に垂直な軌道をもつ π 電子軌道

- π 結合は原子核から距離があり 軌道の重なりも小さい為
 σ 結合よりも結合力が弱く、エネルギー準位が高い。

- π 電子

- スピン0:シングレット状態
- スピン1:トリプレット状態

- 励起された電子

→S10 (<10ps)

+ 格子振動

→S0 (S00~S03)(100ps~1ns)

+ 紫外光 (蛍光)

→T1 (<10ps)

+ 格子振動

■ T1 + T1 → S0 + S* + phonons ($\mu\text{s} \sim \text{ms}$)

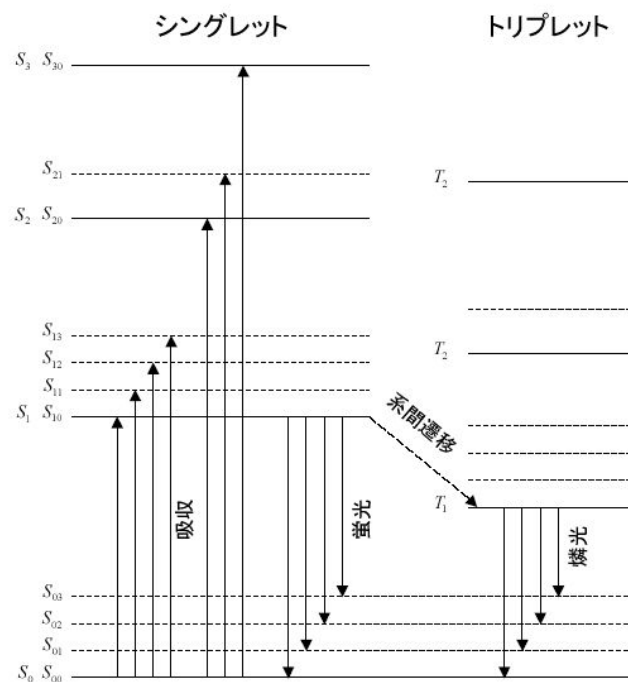
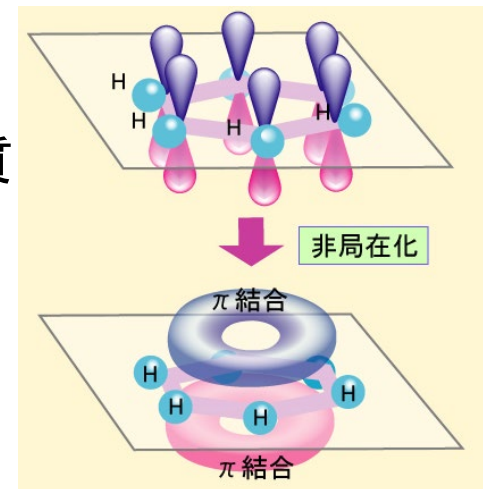


図 2.3 π 電子構造を持つ有機分子のエネルギー準位

プラスチック基材

Plastic Scinti

■ ポリスチレン モノマーに、

PBD, PBO, p-Terphenyl等の発光体を加えたもの

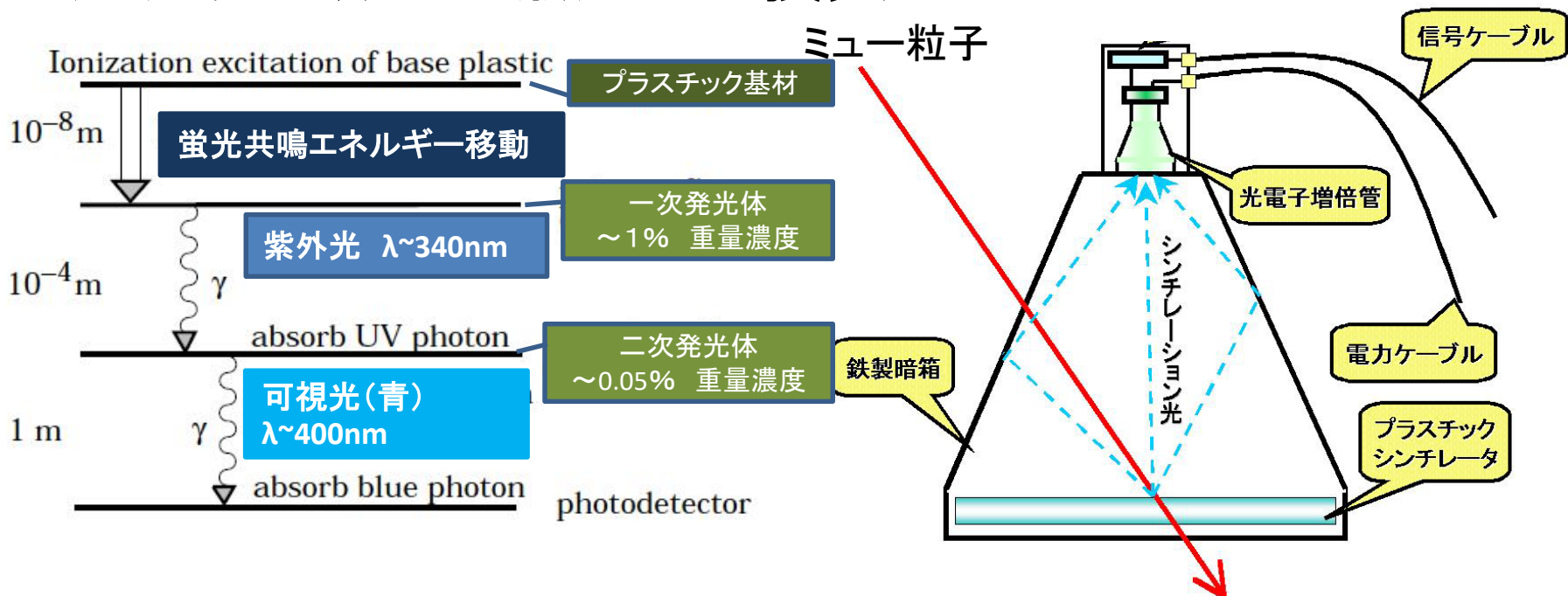
一次発光体

■ Wave length ShifterとしてPOPOP等を入れて、扱いやすい波長に変換することもよく行われる

二次発光体

■ 長所: 機械的に安定、等方性、形状も自在

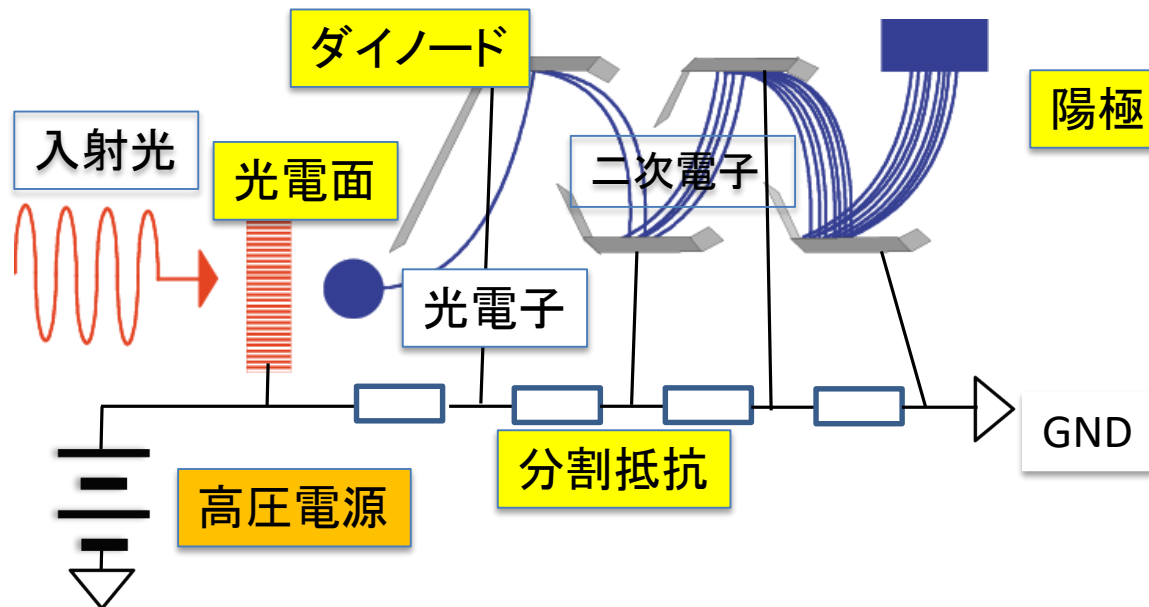
■ 短所: 光量、光の伝搬による損失



光電子増倍管(PMT)の機能

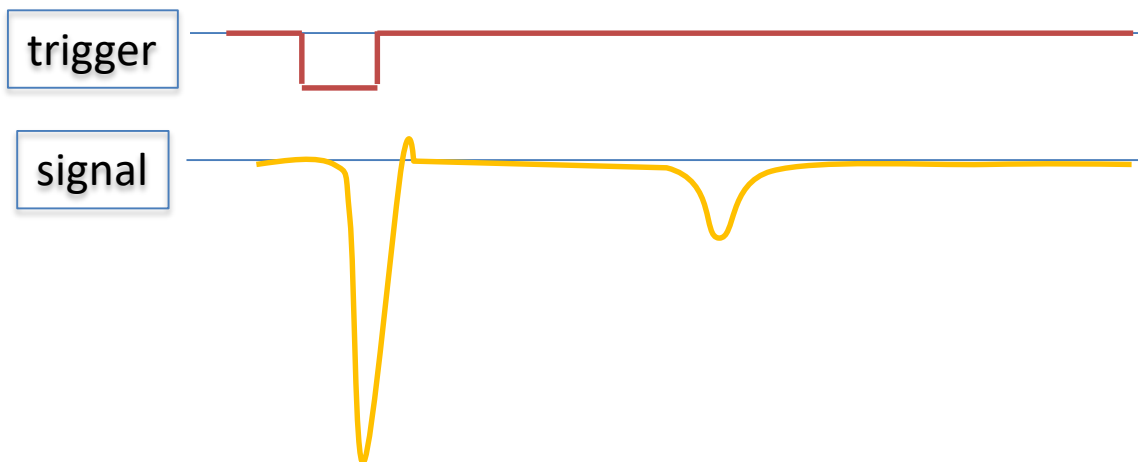
光信号を電気信号に変換する

- 光が光電面(光電陰極)に入射
- 光電効果により光電子を放出
 - 光電効果を起こす確率は量子効率と呼ばれ、20-30%程度
- 光電子はカソード・ダイノード間の電圧で加速され、第1ダイノードにぶつかり3-4個の2次電子を放出する
- この過程が繰り返され最終的に 10^5 - 10^6 倍の増幅率が得られる。



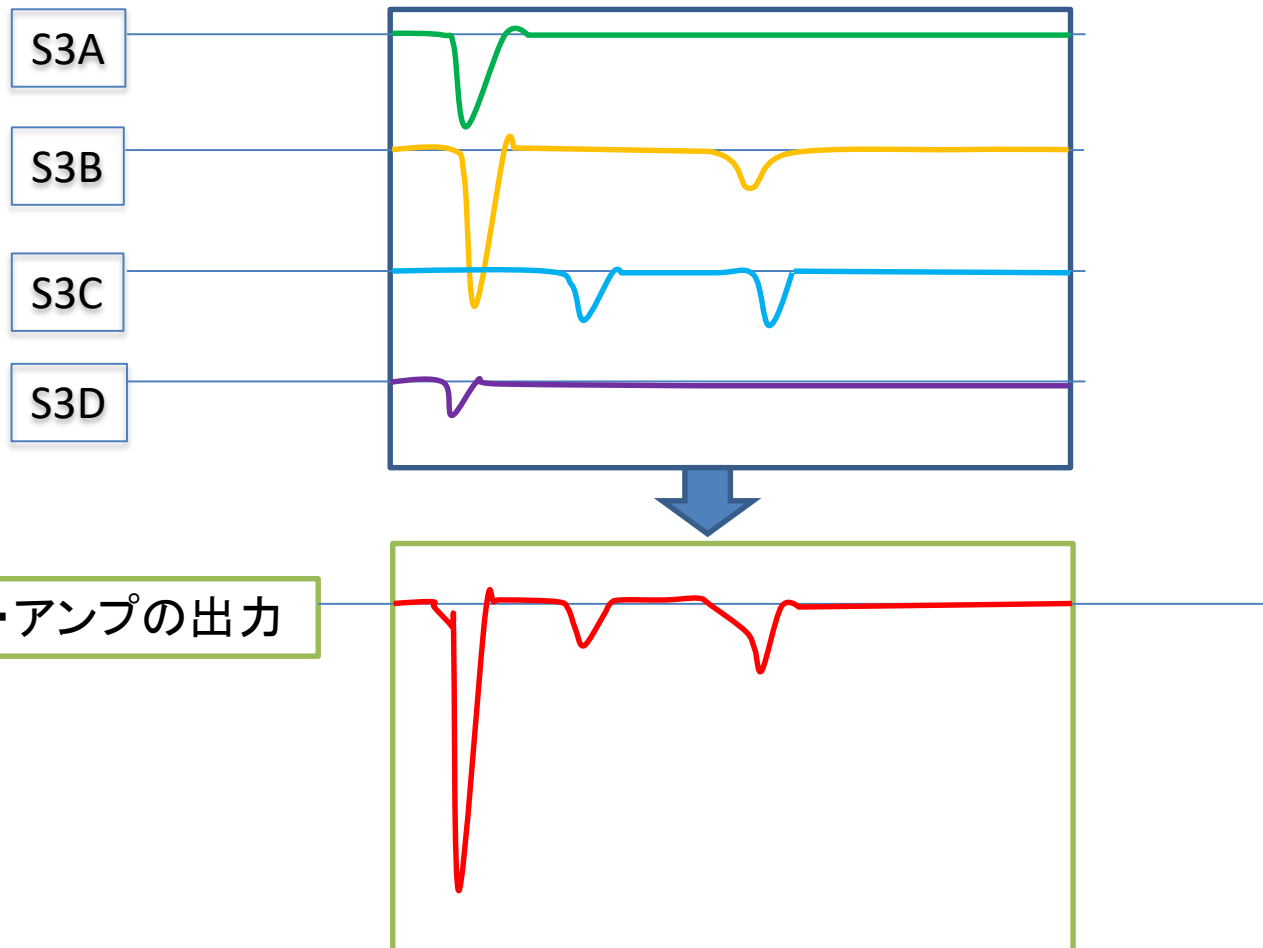
オシロスコープの機能

- トリガー(trigger)入力を基準にとして、
- 各時刻の入力信号の波高(電圧)を測定する
 - この実験では、波形情報をデジタル値としてPCに取り込んで解析する
 - 画面表示を行うデジタル・オシロスコープも併用



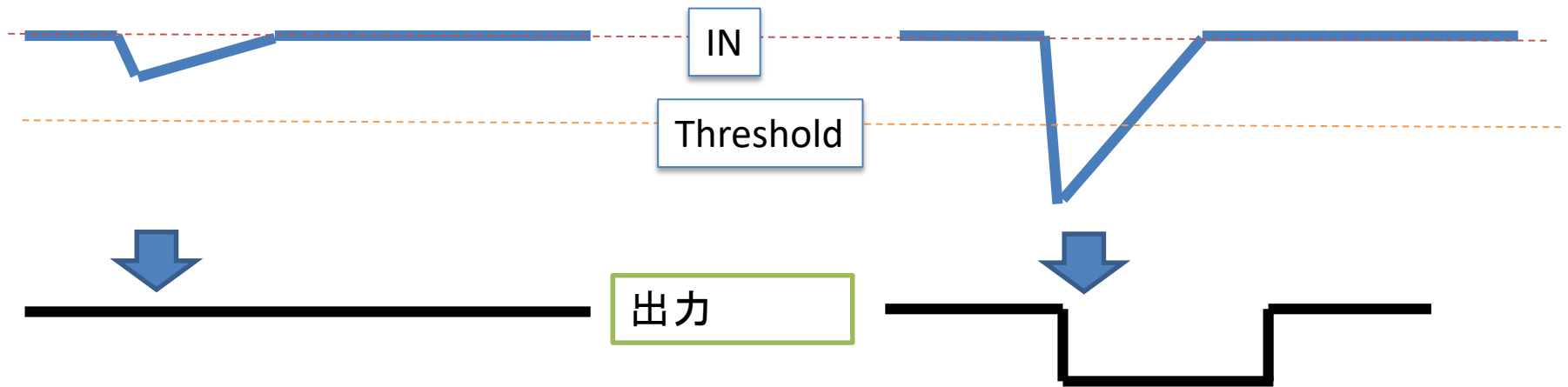
サム・アンプ (Sum Amp)の機能

- アナログ信号を足してアナログ信号を出力する
- S3の4出力を1つにまとめる



ディスクリミネーター: 波形弁別

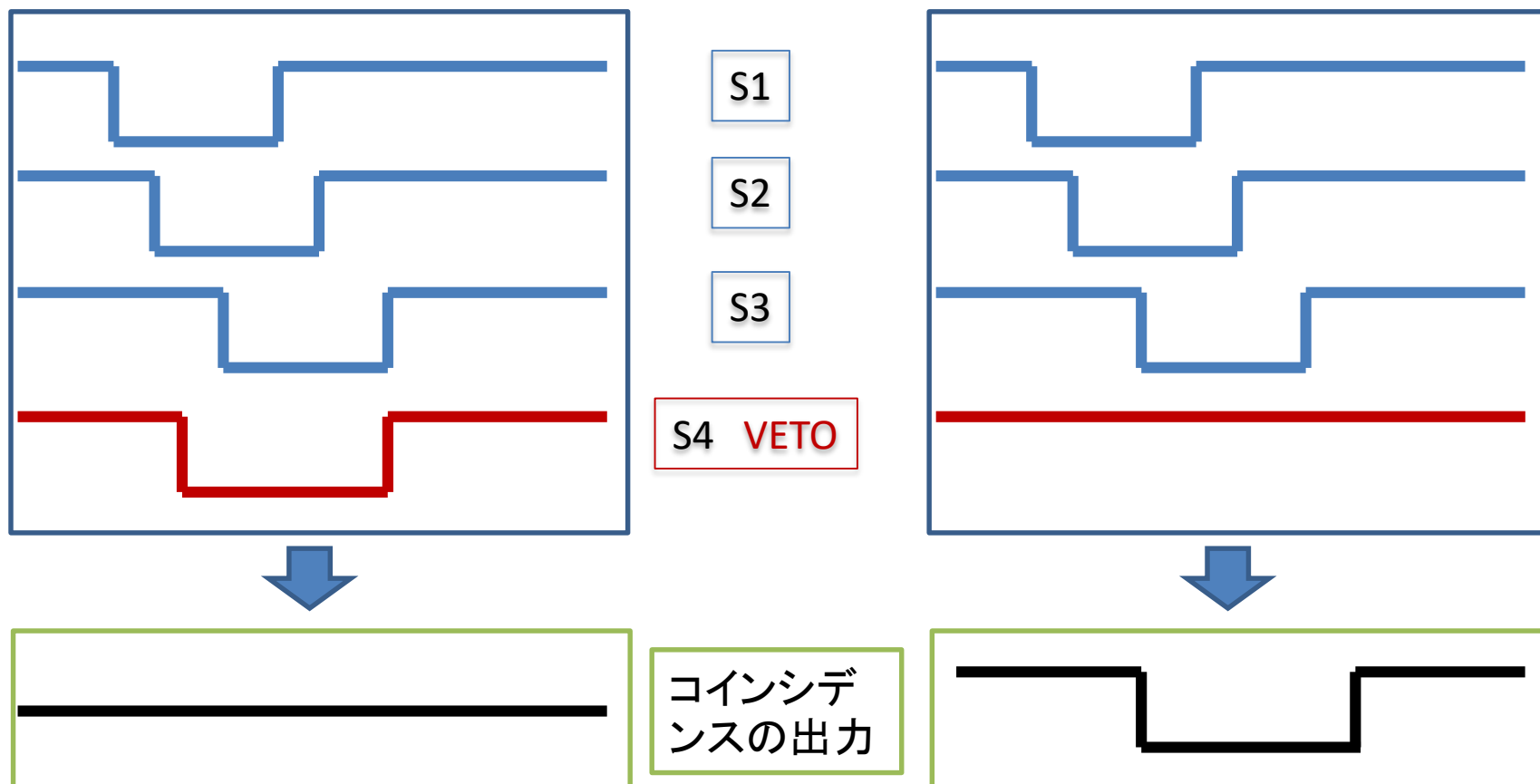
- 閾値 (Threshold) 電圧より大きな入力があるとき、出力する(一定のパルス幅)



- ノイズなどの、閾値電圧より小さい波形を排除
- 出力の立下りが信号の到来時刻を示す

コインシデンス: VETOの機能

- VETO入力がある間、出力を抑制する
- VETOのタイミングに漏れがないかどうか要確認



実験操作

実験操作: 1/2

- (ア) 装置の配線確認をして、p.2の図を完成させる。
- (イ) 検出器のサイズを測定
- (ウ) ディスクリの「しきい値」の確認をする。
 - 結果を1/10の値でホワイトボードに書く。
 - ノイズが多いとき等、しきい値を調整する。
- (エ) シグナルの確認・タイミングの確認をして、ホワイトボードに結果を記入する。

実験操作: 2/2

- (オ)データ収集プログラムの操作練習をする。
- (カ)「実験1」を試験的に行う。
 - μ -e崩壊の例を観察した後、実験1を停止し、配線を「実験2」用に変更する。
- (キ)「実験2」を開始する。

次回以後：ノートPC等持ってきてください
(エクセルなどを使った計算を行います)