

Fundamental Particle Physics Lab.

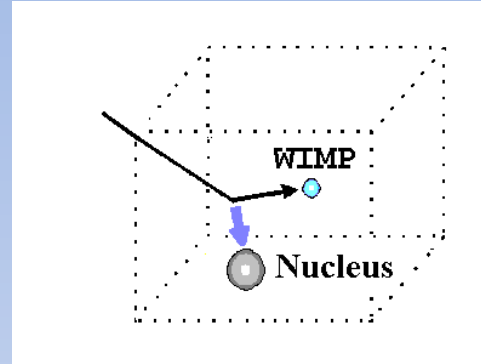
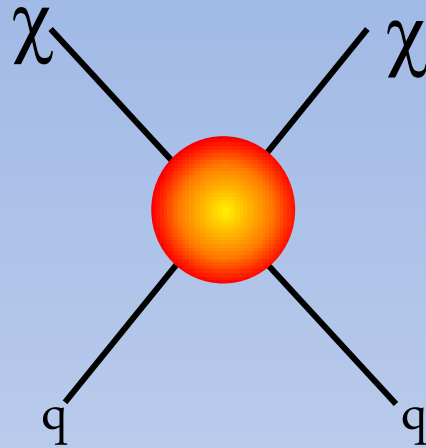
Division of Particle and Astrophysical Sciences
School of Science of Nagoya University

高分解能原子核乾板を用いた暗黒物質探索

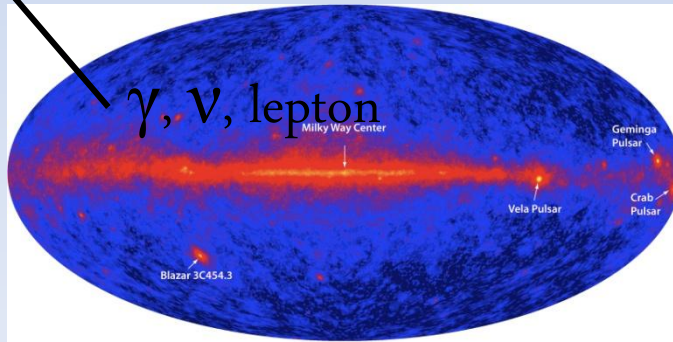
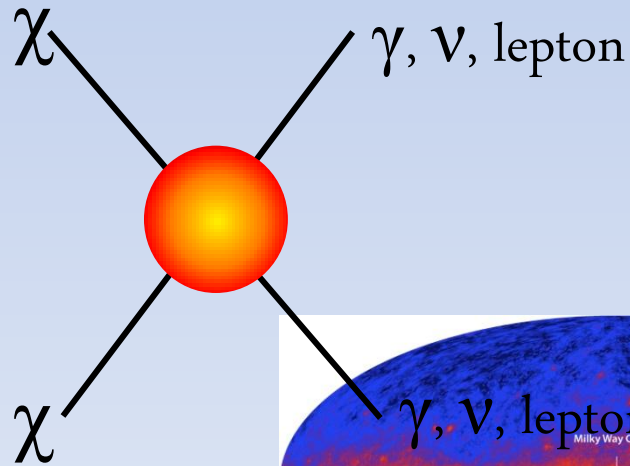
中 竜大
名古屋大学基本粒子研究室(F研)

ICEPPシンポジウム@白馬 2010.2.14-17

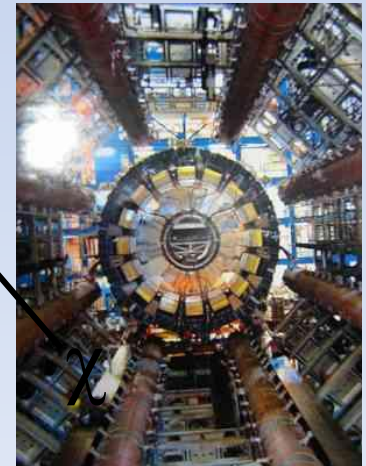
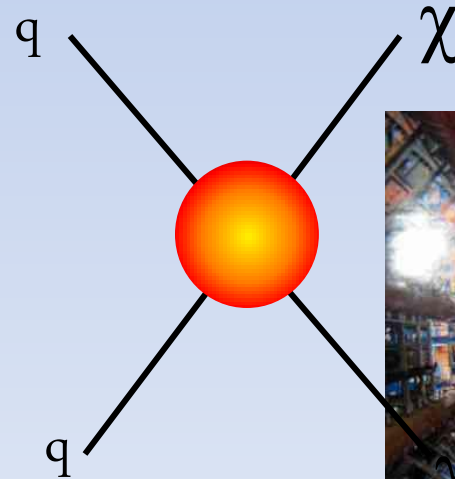
Direct Detection



Indirect Detection



Accelerator Detection



Direct Dark Matter Search

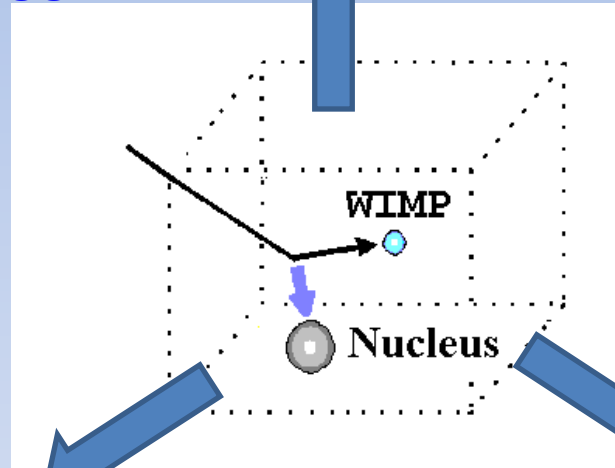
Target : Xe, Ge, Si, NaI, Ar etc

CDMS, EDELWEISS



phonon

CRESST



light

ionization

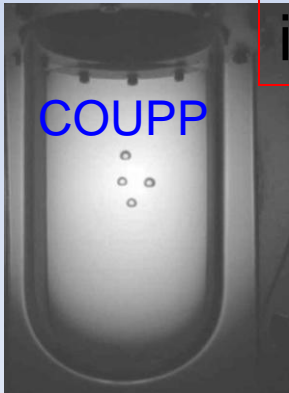
XENON, WARP, ZEPELIN



XMASS, DAMA, KIMs



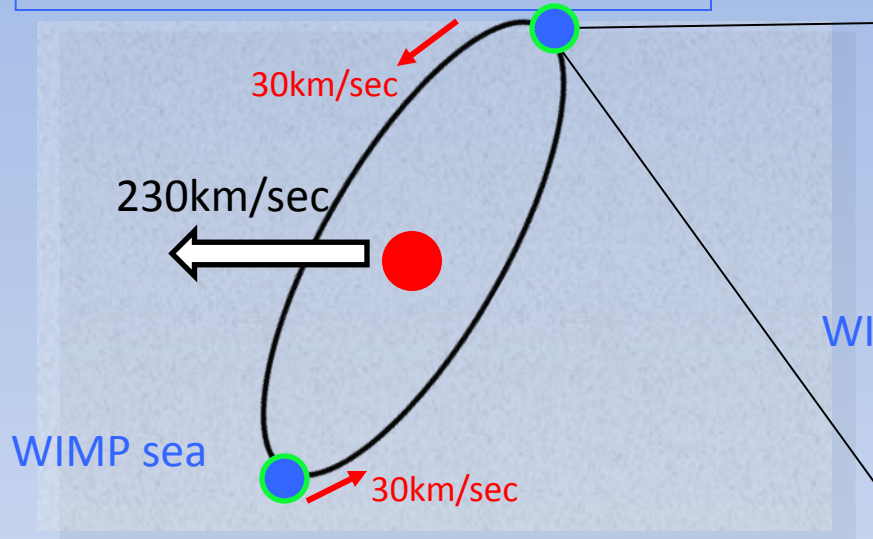
COUPP



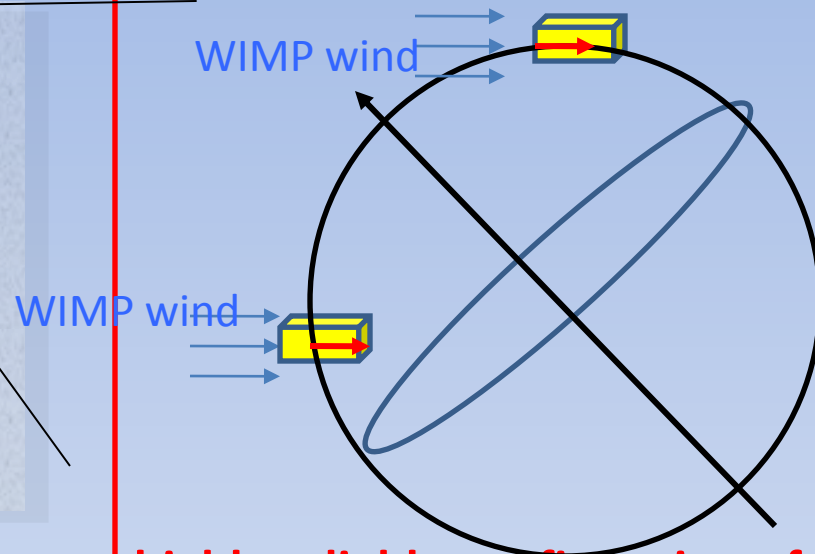
How to detect the WIMP

Detect the nuclear recoil by WIMP

annual modulation detection



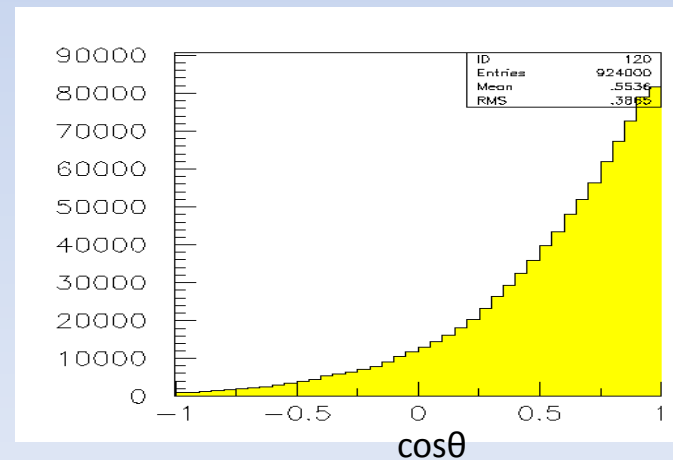
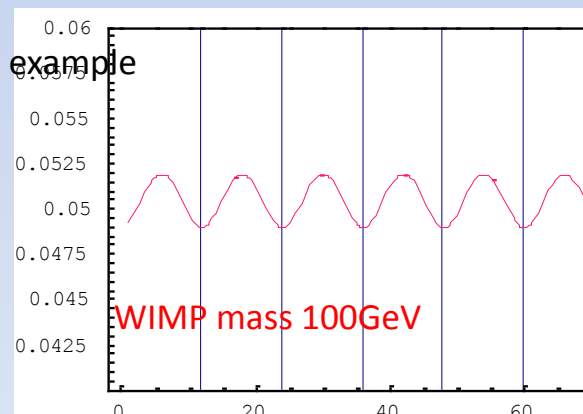
Directional detection



highly reliable confirmation of WIMP

Require long exposure and large mass.

Event rate [/kg/kev/day]



原子核乾板によるDMの方向検出

原子核乾板

- ・固体飛跡検出器(密度 $\sim 3\text{g/cc}$) \rightarrow target mass
- ・高い位置分解能 \rightarrow tracking

\Rightarrow 世界中で、target massを稼げて、DMの方向検出が可能な検出器のアイディアはこれだけ。



Vitaly Ginsburg
(2003 Nobel Prize)

すごくおもしろい。
もっと若ければこの研究をやりたいかった。。。

Directional Dark Matter Detector

gas

DRIFT ($\text{CS}_2, \text{CS}_2\text{-CF}_4$)

NEWAGE (CF_4)

DM-TPC (CF_4)

MIMAC ($^3\text{He}/\text{CF}_4$)

solid

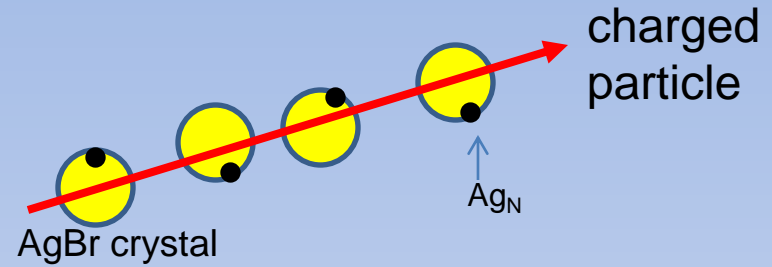
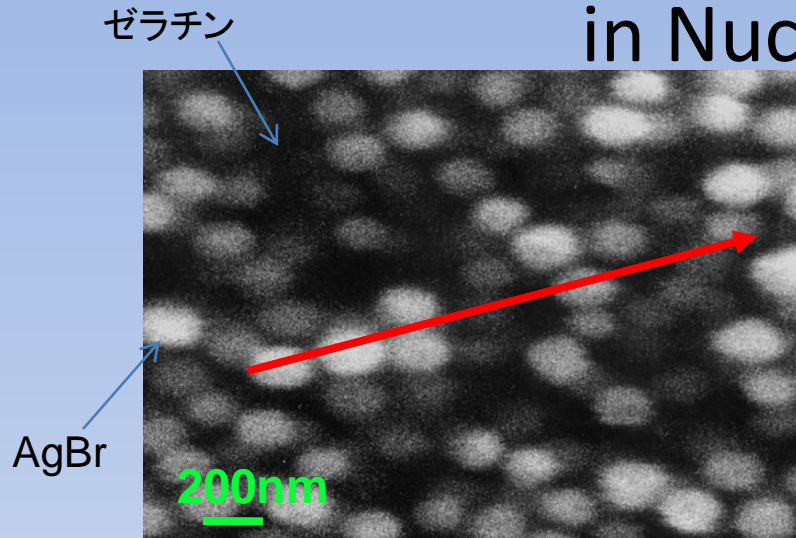
Nuclear emulsion (AgBr)

特にSpin dependentな反応に
有利なtarget

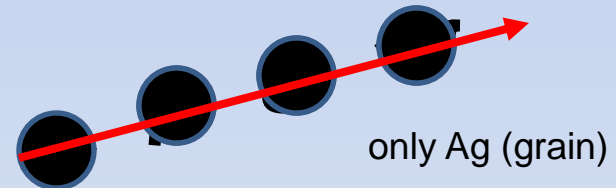
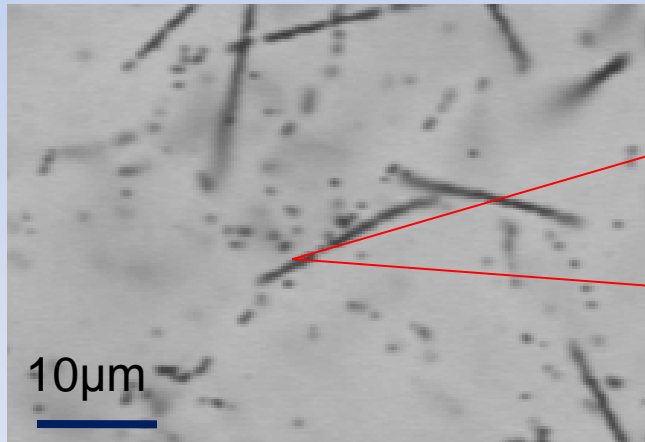
Spin independentな反応に有利
(SDにも感度あり)

Collaboration	Technology	Target	Interactions	Head-tail	Readout	V (m ³)
DRIFT	NITPC	$\text{CS}_2, \text{CS}_2\text{-CF}_4$	SI/SD	yes	MWPC 2D + timing	1
DMTPC	TPC	CF_4	SI/SD	yes	Optical (CCD) 2D	0.01
NEWAGE	TPC	CF_4	SI/SD	no	μPIC 2D + timing	0.03
MIMAC	TPC	$^3\text{He}/\text{CF}_4$	SI/SD	yes	Micromegas 2D + timing	0.00013
<u>Emulsions</u>	<u>emulsions</u>	<u>AgBr</u>	<u>SI/SD</u>	<u>no</u>	<u>Microscope 3D</u>	<u>N/A</u>

Principle of the Track detection in Nuclear Emulsion



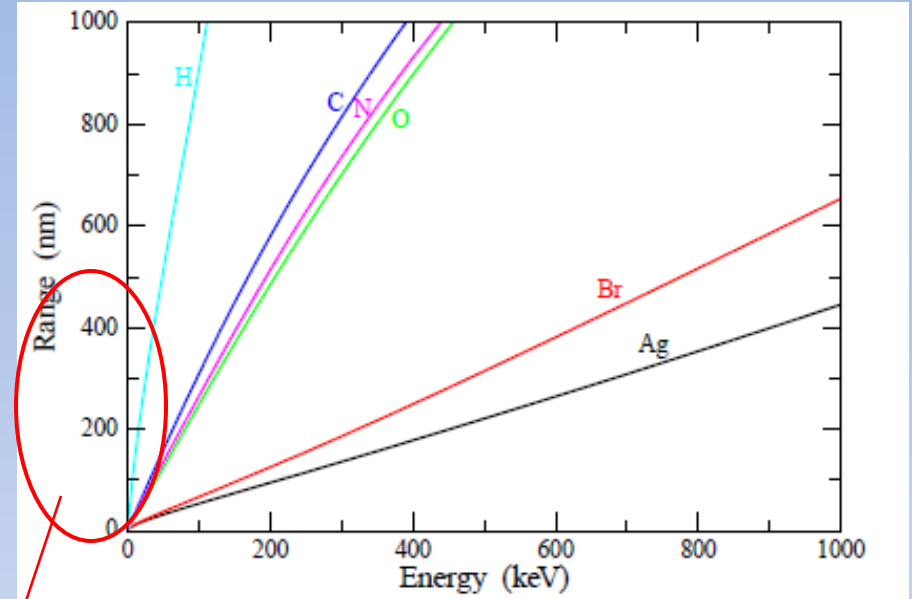
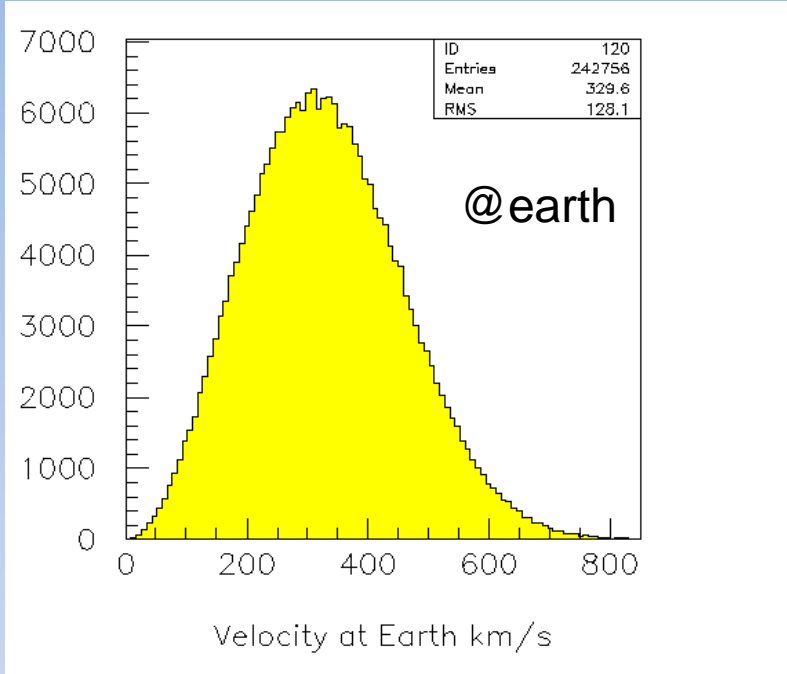
Development



Developing probability depend on the dE/dx of the incident particle

Resolution depend on AgBr size and density.

Required resolution of Nuclear Emulsion



Ex) WIMP mass any hundred GeV/c^2

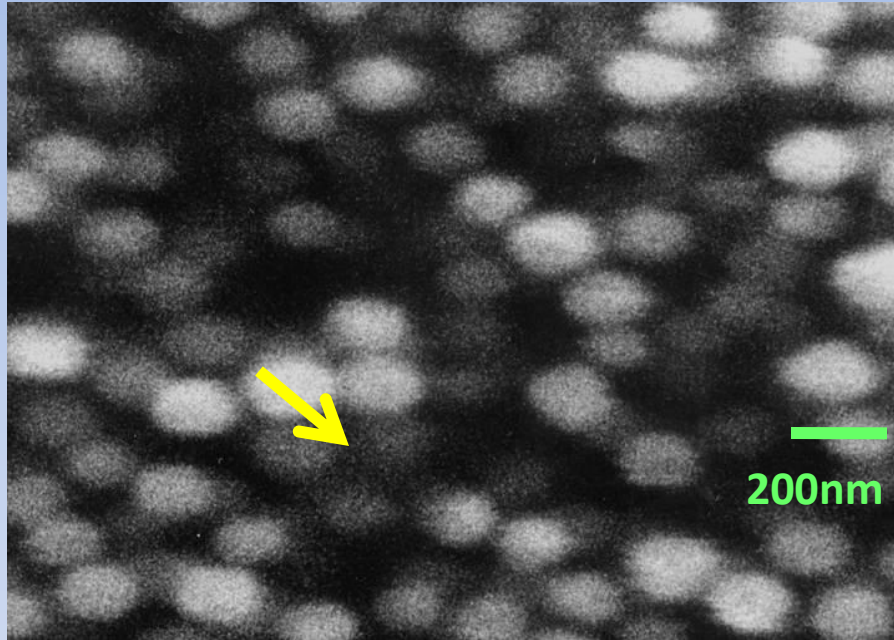
Target : heavy atom (Br,Ag) < 600keV **recoil energy**
light atom (C,N,O) < 100keV



Required tracking resolution < 300~400nm

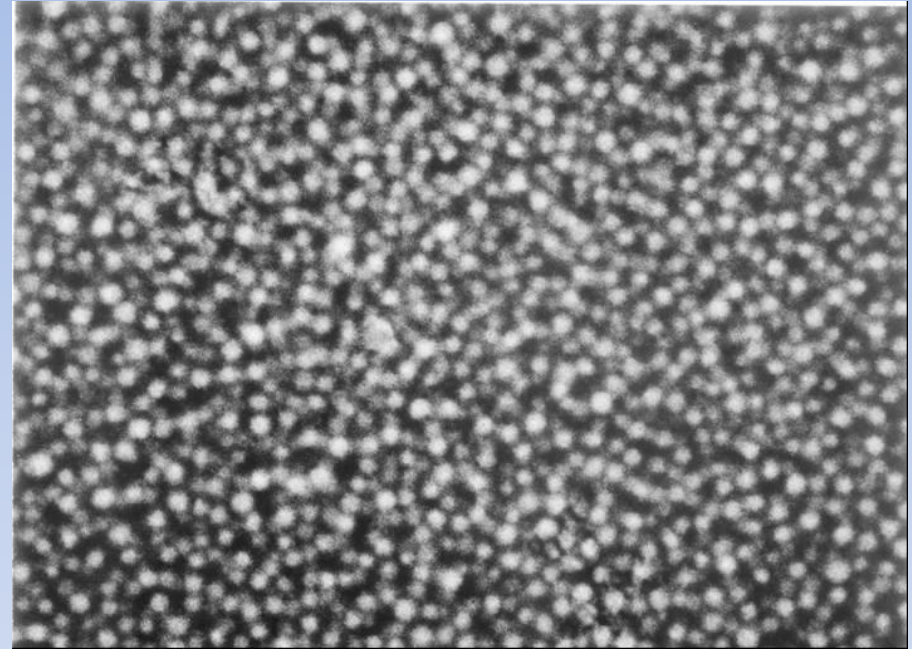
High resolution emulsion (Nano Imaging Tracker:NIT)

normal emulsion(OPERA emulsion)



size 200 ± 16 nm
density 2.8g/cc $\rightarrow V_{\text{AgBr}} : V_{\text{gel}} = 3 : 7$
 \downarrow
2.3 grains/ μm

NIT



size 40 ± 9 nm
density 2.8g/cc $\rightarrow V_{\text{AgBr}} : V_{\text{gel}} = 3 : 7$
 \downarrow
11 grains/ μm

5times high resolution

Check of the sensitivity of nuclear emulsion to the low velocity Kr ion.



Low velocity ion created by an ion implantation system

サイズ 7cm×3cm

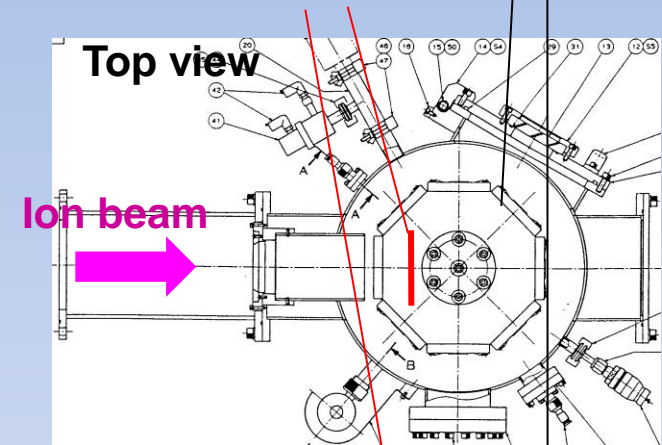
乳剤層の厚み

NIT: 5 μ m

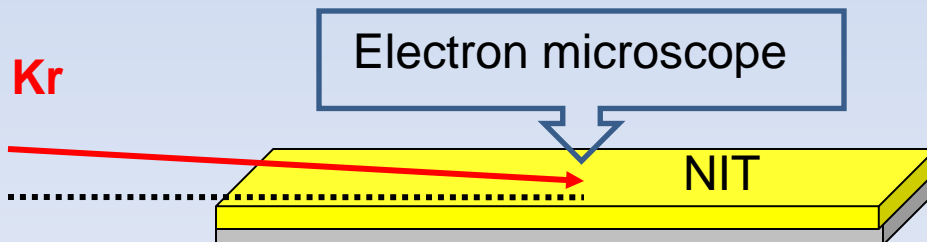
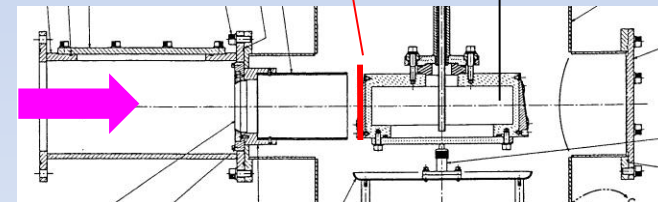
OPERA: 20 μ m

Rotation stage

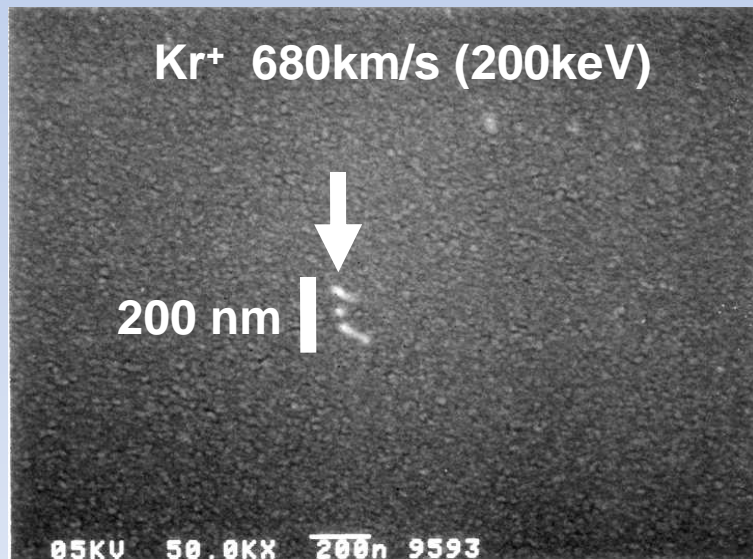
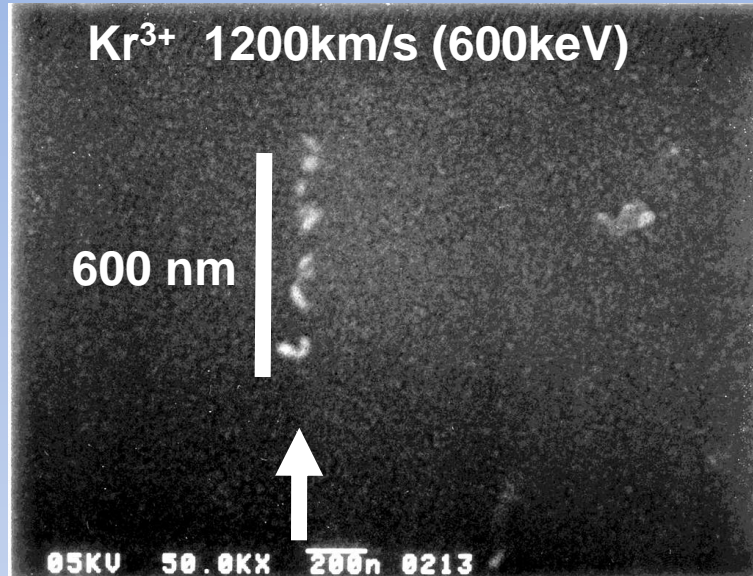
NIT emulsion



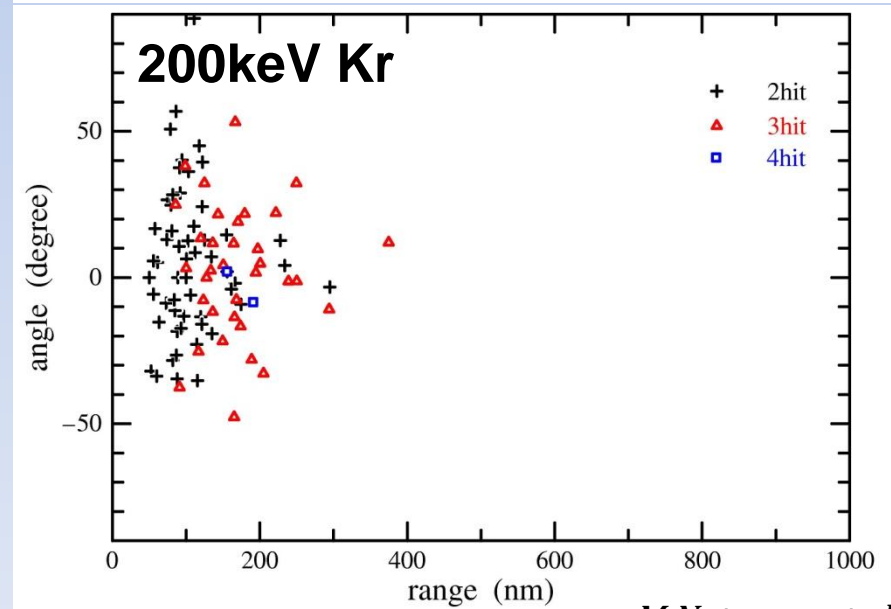
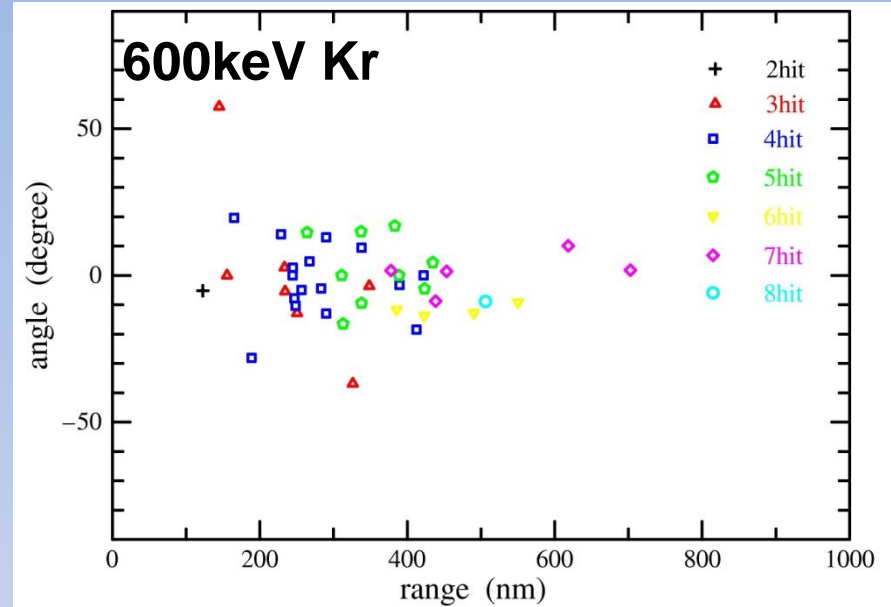
Side view



SEM image



Track data



NIT can detect tracks recoiled by WIMPs!

主な課題

- 1 μ m以下の飛跡をいかに読みだすか
→このR&Dがもつともchallenging
(これをclearすればすぐに実験開始が可能)
- Background rejection
- より高分解能なNIT→lower energy threshold

OPERA実験まで蓄積された原子核乾板技術の延長とは違った
アプローチが必要！！

Strategy of readout of submicron NR track

⇒これさえできれば、massを増やすのは簡単！！

1. Expanding emulsion

⇒emulsionを膨らますことで、飛跡を引き伸ばす
100nm (need electron microscope)



1 μ m (can use optical microscope)

長所
Track認識が非常に
簡単
短所
Scanning volumeの
増大

2. 銀粒子からの散乱光における非線形応答

散乱光から飛跡候補をpick up

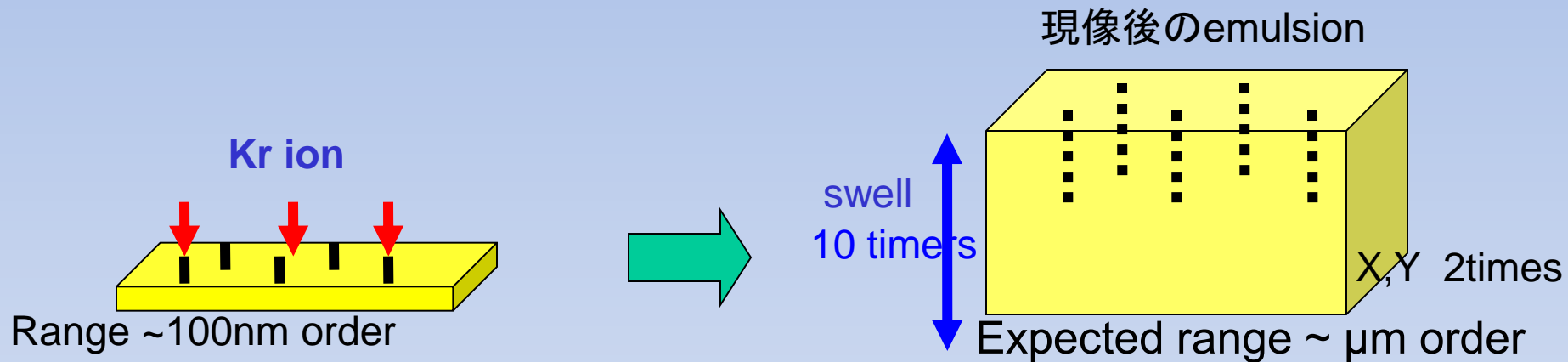


高分解能な顕微鏡でcheck

長所
高速scanning
短所
銀粒子のサイズ・形状の制御

Swell the low velocity ion tracks recorded in the NIT

Swell technique of NIT emulsion



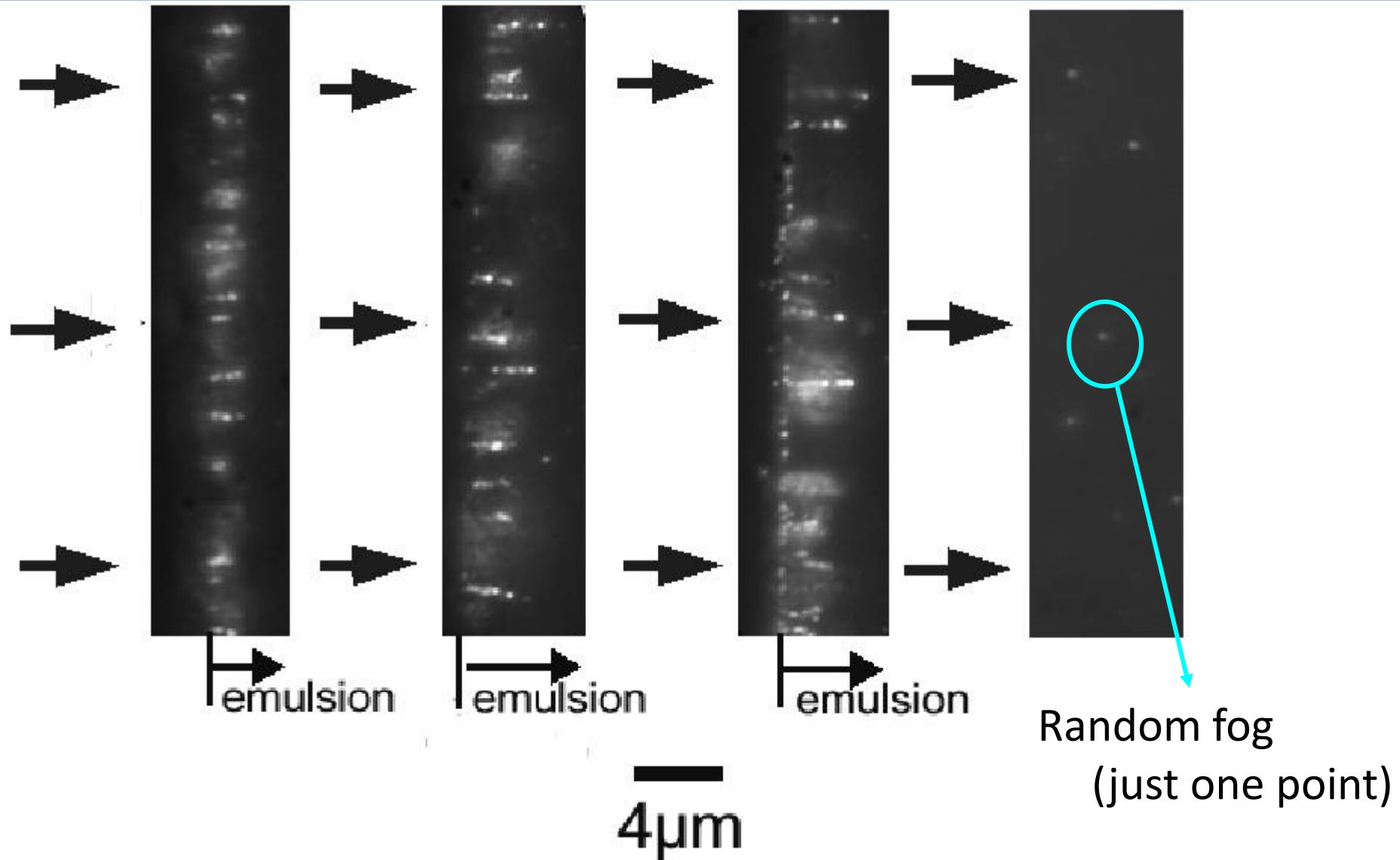
ph treatment + glycerin treatment \Rightarrow Larger swelling (possible to 10 times!)

200keV

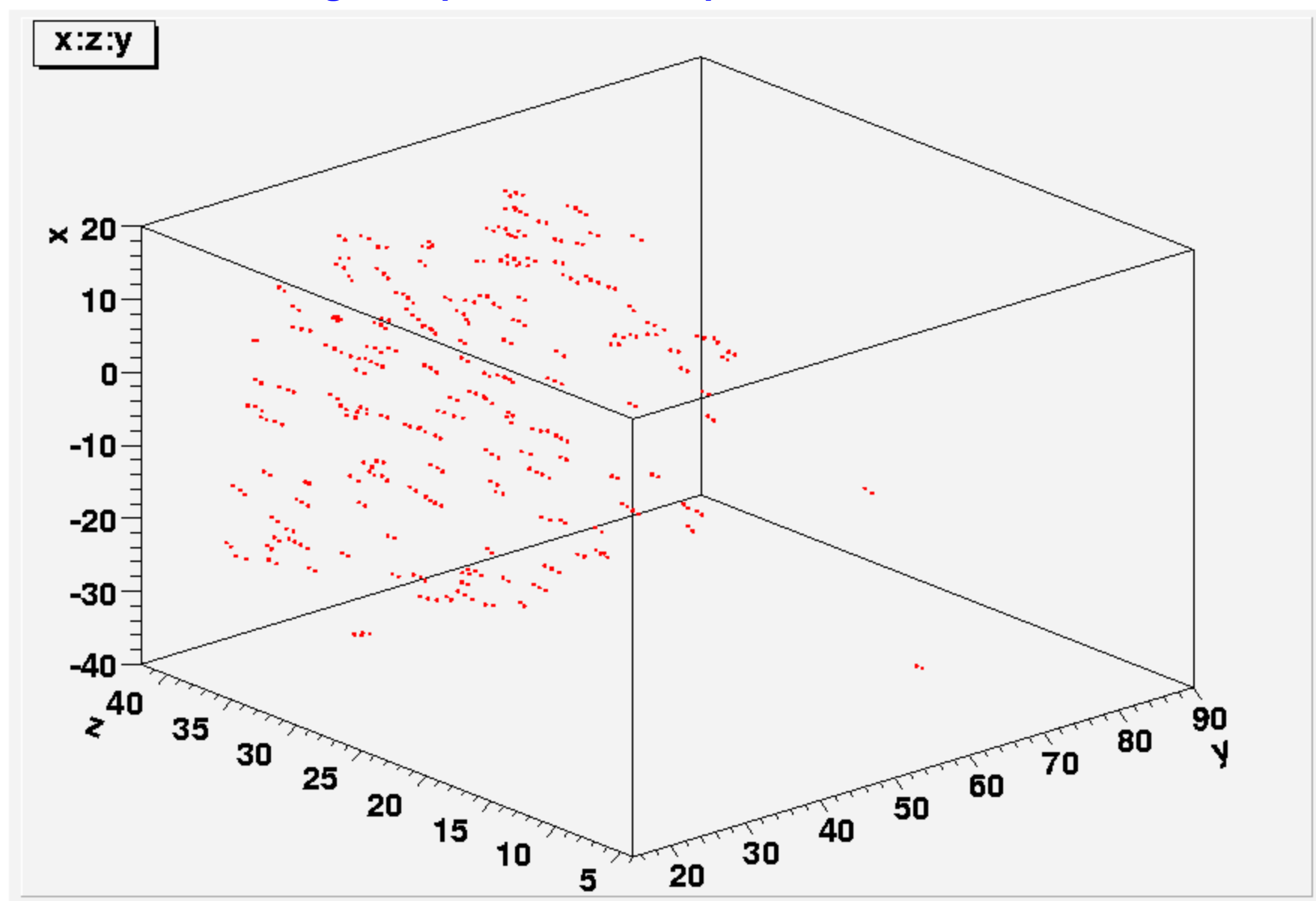
400keV

600keV

No exposure



600keV Kr 3D image of optical microscope

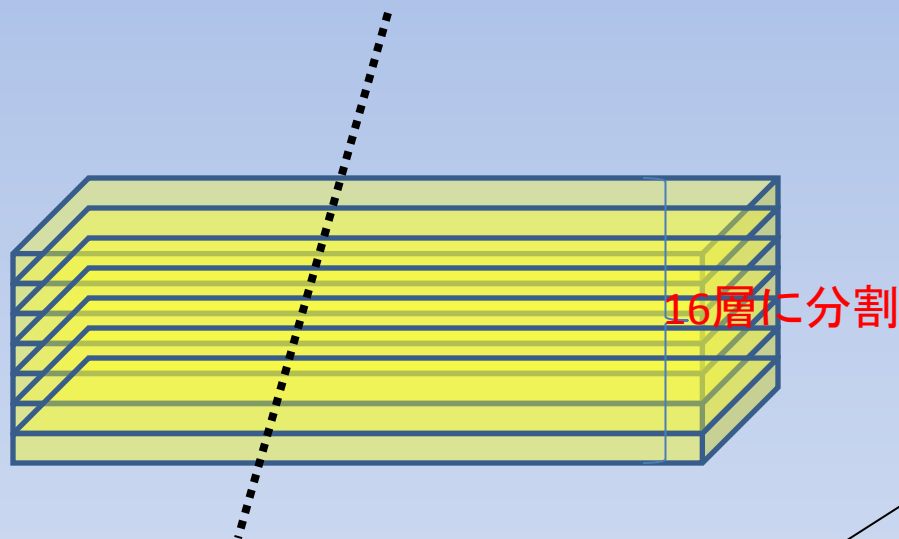


Automatic scanning R&D by UTS

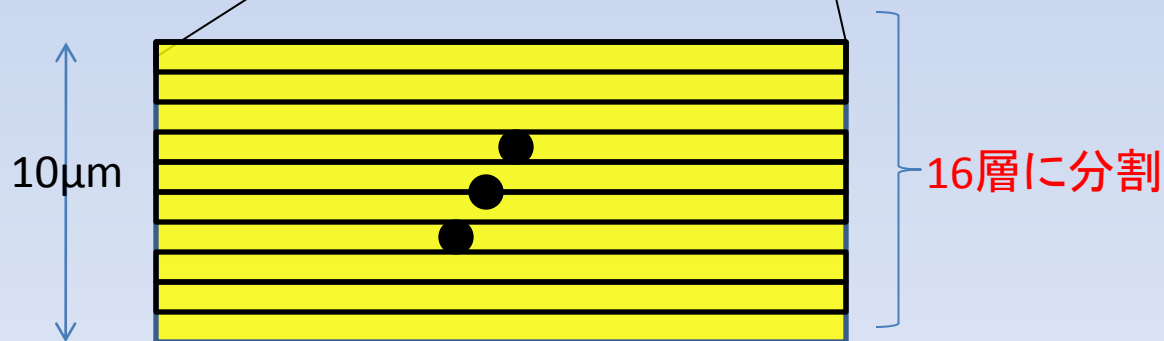
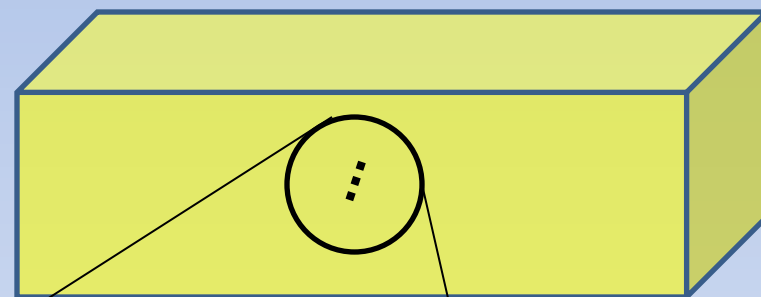


中性子によるrecoil trackでscanning test

通常の原子核乾板の飛跡認識



今回の飛跡認識

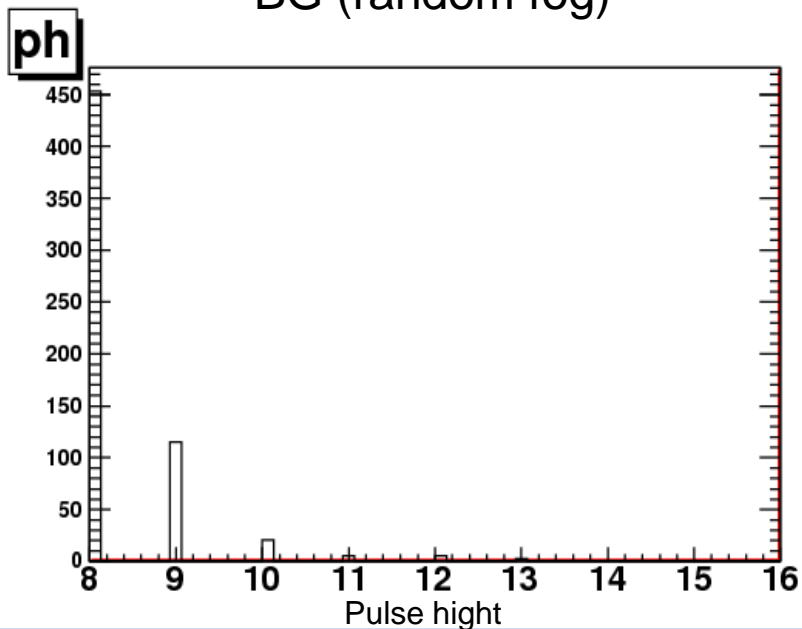


- ・暗視野顕微鏡を使用
- ・任意の深さポイントからscan

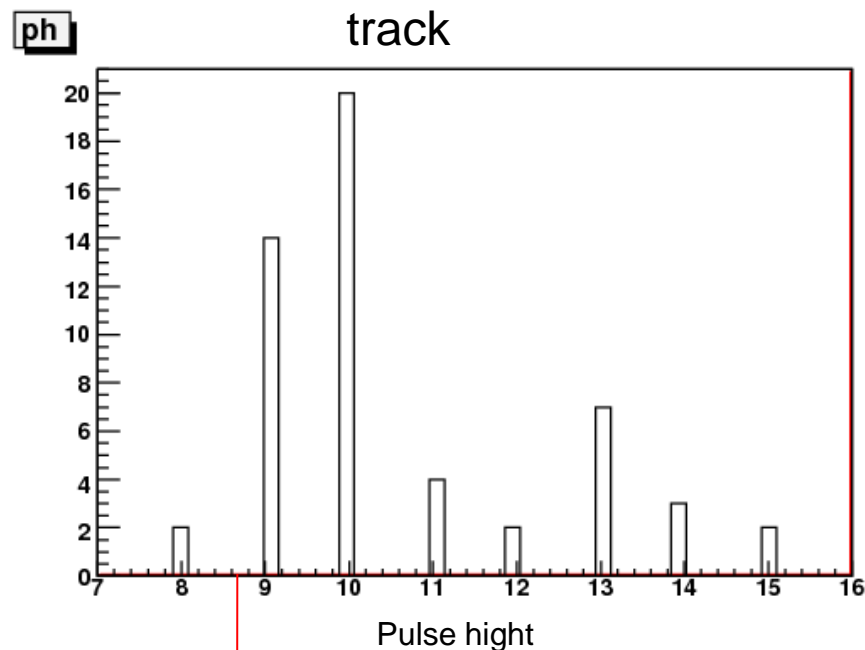
4μm

Automatic scanning R&D result

BG (random fog)



track



Ph>9

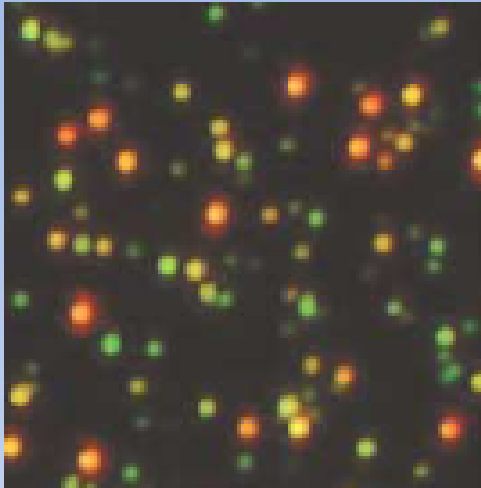
Tracking efficiency

ph>9 cut 86+-11%

ph>10 cut 81+-13%

散乱光のtrack情報

Gold nano particle



金属ナノ粒子のプラズモン共鳴

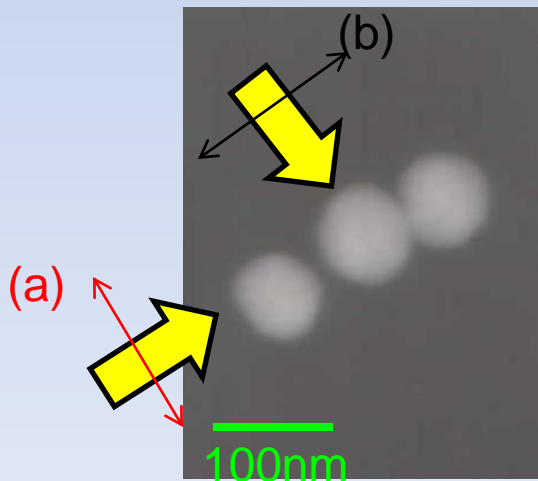
$$p = \frac{\epsilon(\omega) - 1}{\epsilon(\omega) + 2} a^3 E$$

誘電関数 $\epsilon(\omega) = -2$ のときの周波数で共鳴ピークを持つ。
ここで、 $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / \omega^2$ [ドルーデモデル近似]

共鳴周波数は、サイズや形状、金属種に依存。
(emulsionでは銀ナノ粒子)

並んだ銀ナノ粒子光学応答

→偏光方向による散乱強度の違い



双極子モーメント

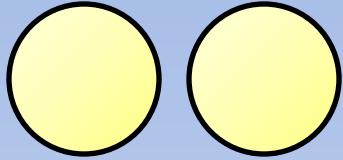
a) $P = (1 - \alpha/r^3)p_0$

b) $p = (1 + 2\alpha/r^3)p_0$

$$\alpha = \frac{\epsilon(\omega) - 1}{\epsilon(\omega) + 2} a^3$$

b)の方が $2p_0$ より大きな双極子が誘起される。a)では、 $2p_0$ より小さくなる。

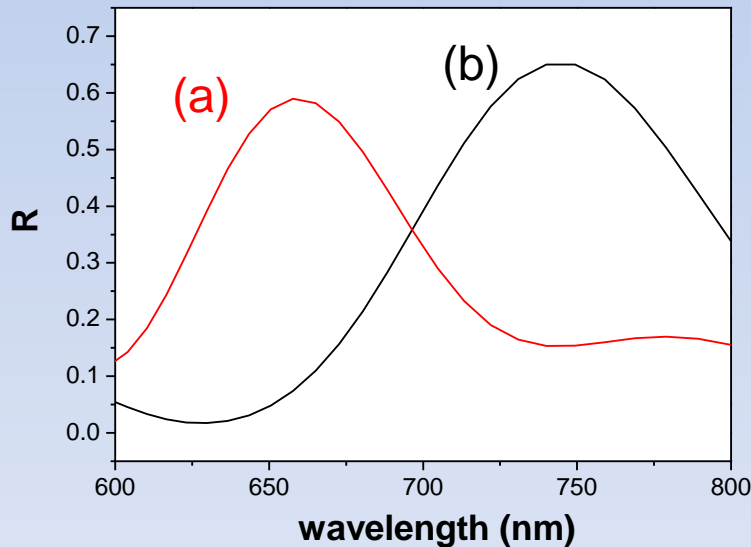
原子核乾板中での利用



= NIT中での飛跡 (銀ナノ粒子の並び)

乾板中で100nmの銀粒子が並んだ場合を
シミュレーション (媒質屈折率=1.5)

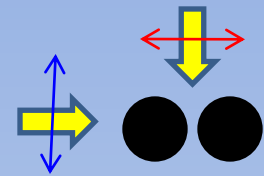
FDTD simulation



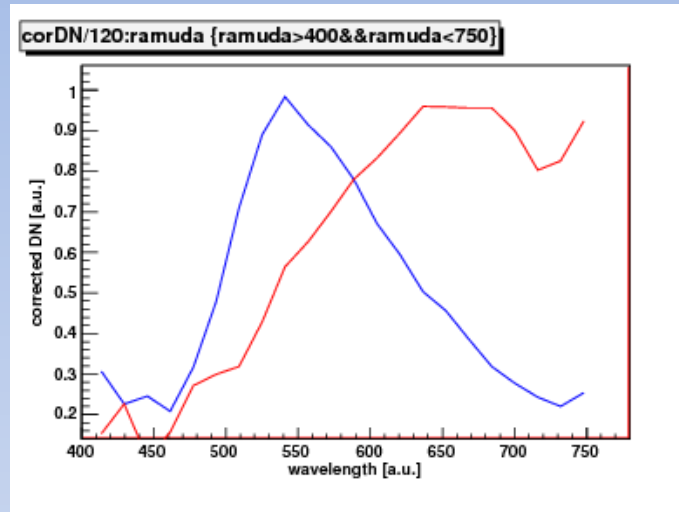
飛跡候補の高速選び出し
→波長: サイズ、偏光依存: 方向

高分解能の顕微鏡で飛跡を最終チェック!

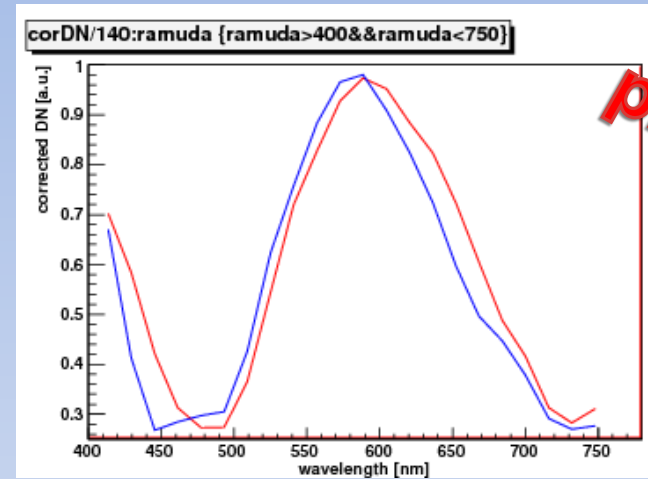
Spectrum



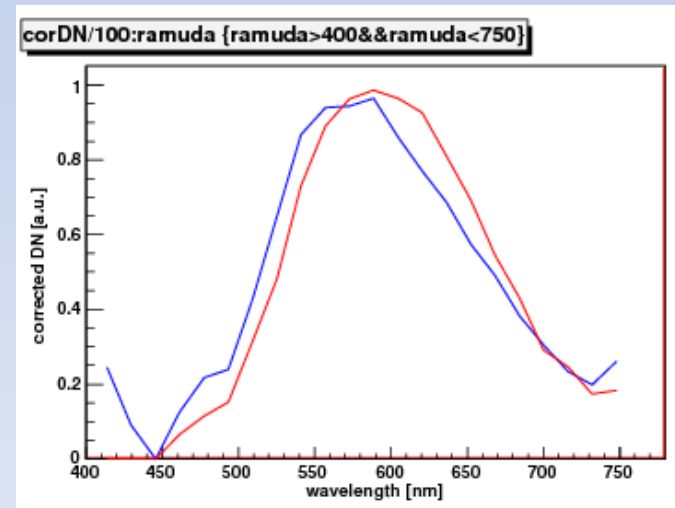
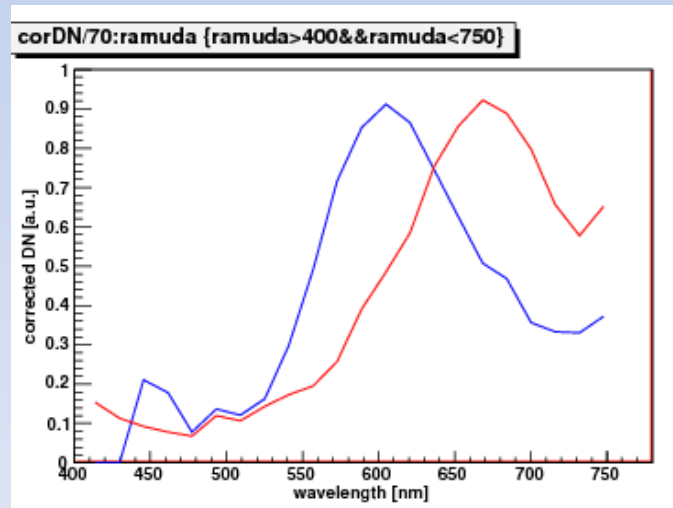
Wavelength shift event



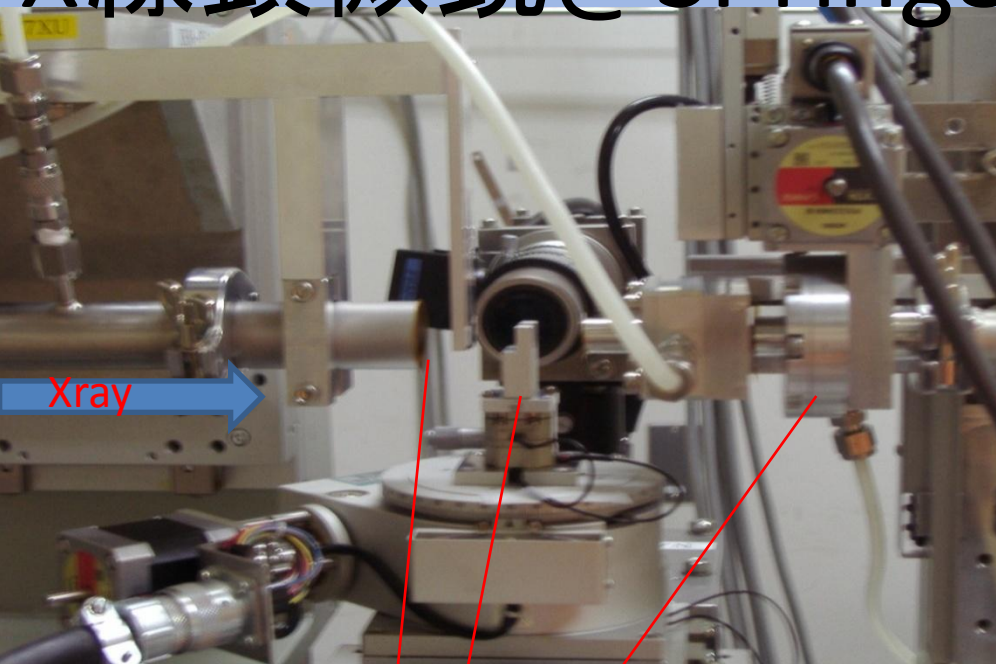
No wavelength shift event



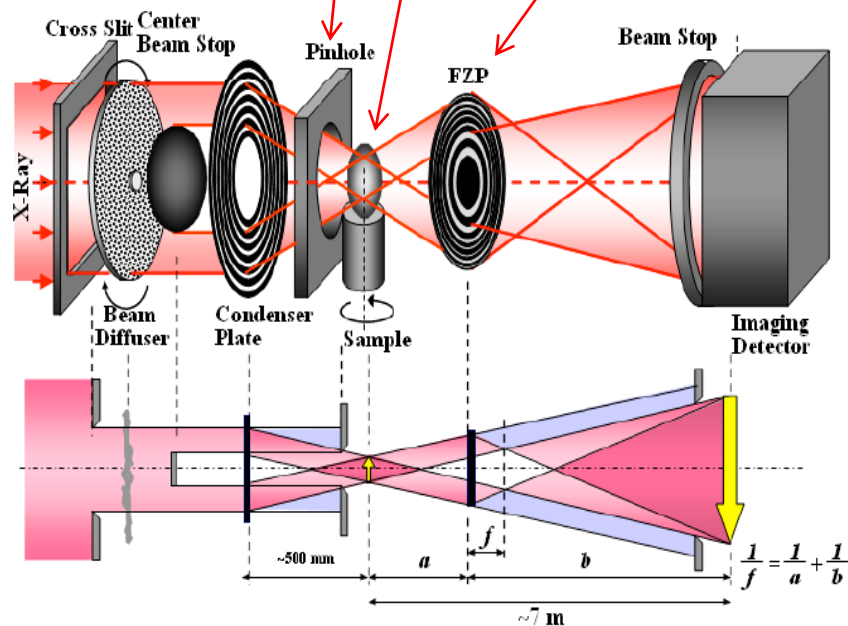
preliminary



X線顕微鏡@SPring8



- ・100 μm 厚の乾板も観察可能
- ・非破壊観察ができる
- ・高分解能($\delta x \sim 100\text{nm}$)



→
Kr (400keV)

400nm

Background rejection concept

For α ray, electron

⇒ Sensitivity control

- nuclear emulsion itself
- development control
- shield

Sensitivity of emulsion is corresponded to generated rate of latent image. ⇒ depending on dE/dx of incoming particle.

→ $<10^{-5}$ rejection power

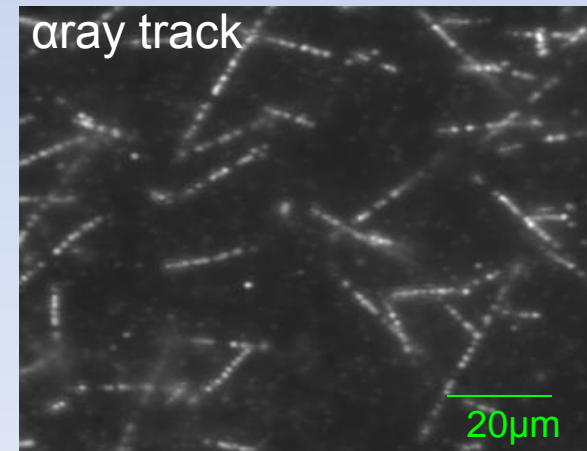
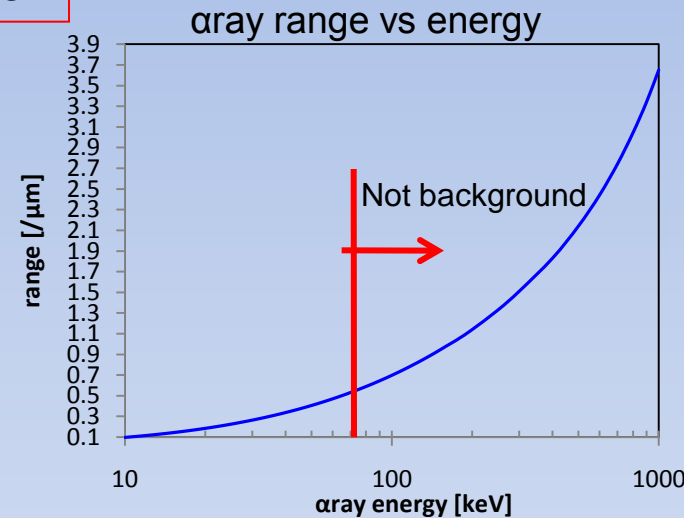
For α ray

- range discrimination
- development control
- fiducial cut

alpha from Th,U chain and Rn is not background

For neutron

- shield
- development control
- directional



乳剤製造システム

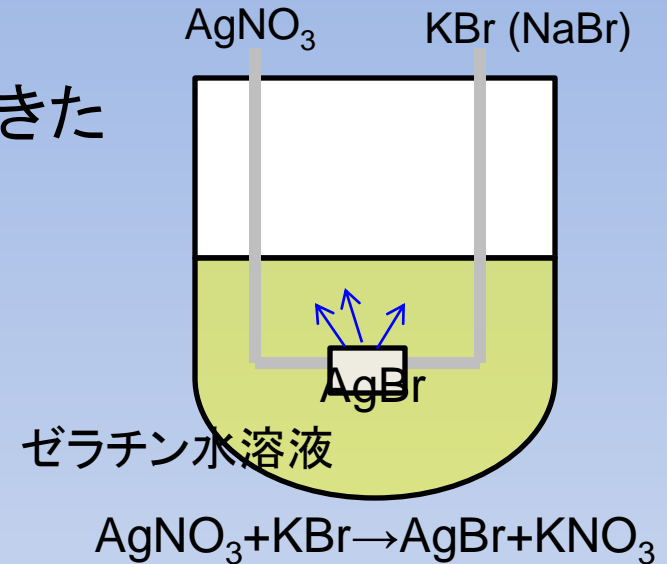
これまでFuji Filmが原子核乳剤を製造してきたが。。。

研究室で乳剤を自由に製造・R&D

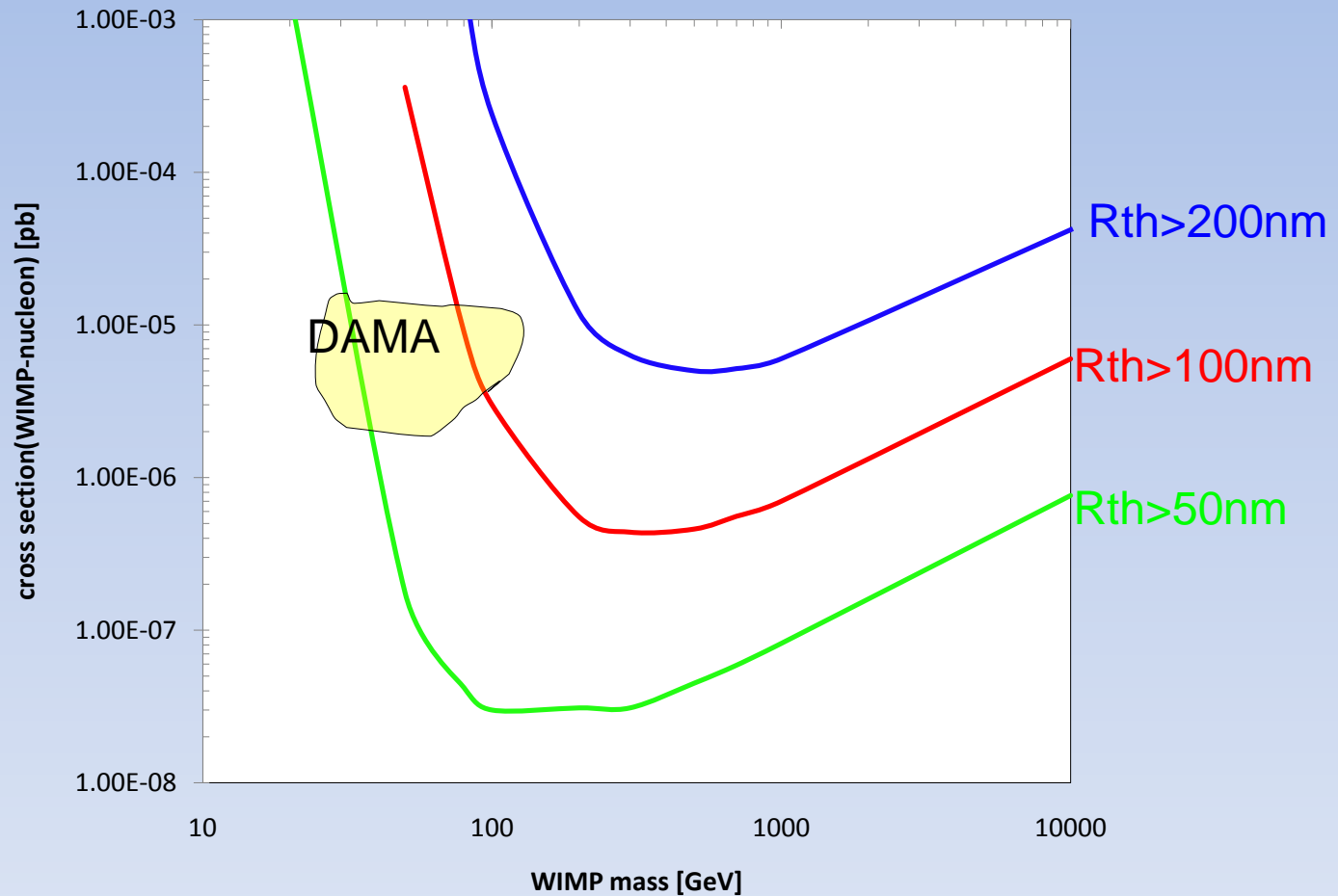
【装置：Fuji Filmの乳剤製造装置メーカーと提携
技官(職人): OPERA film、NITを開発した技術
者の全面協力



- ✓ Qualityの高いNITの定常的な生産
- ✓ 低バックグラウンド(特に⁴⁰K)NIT開発
- ✓ さらなる高分解能NITの開発
- ✓ 高分解能・高感度原子核乾板の開発
- ✓ OPERA乳剤の生産



1kg·year best limit for NIT

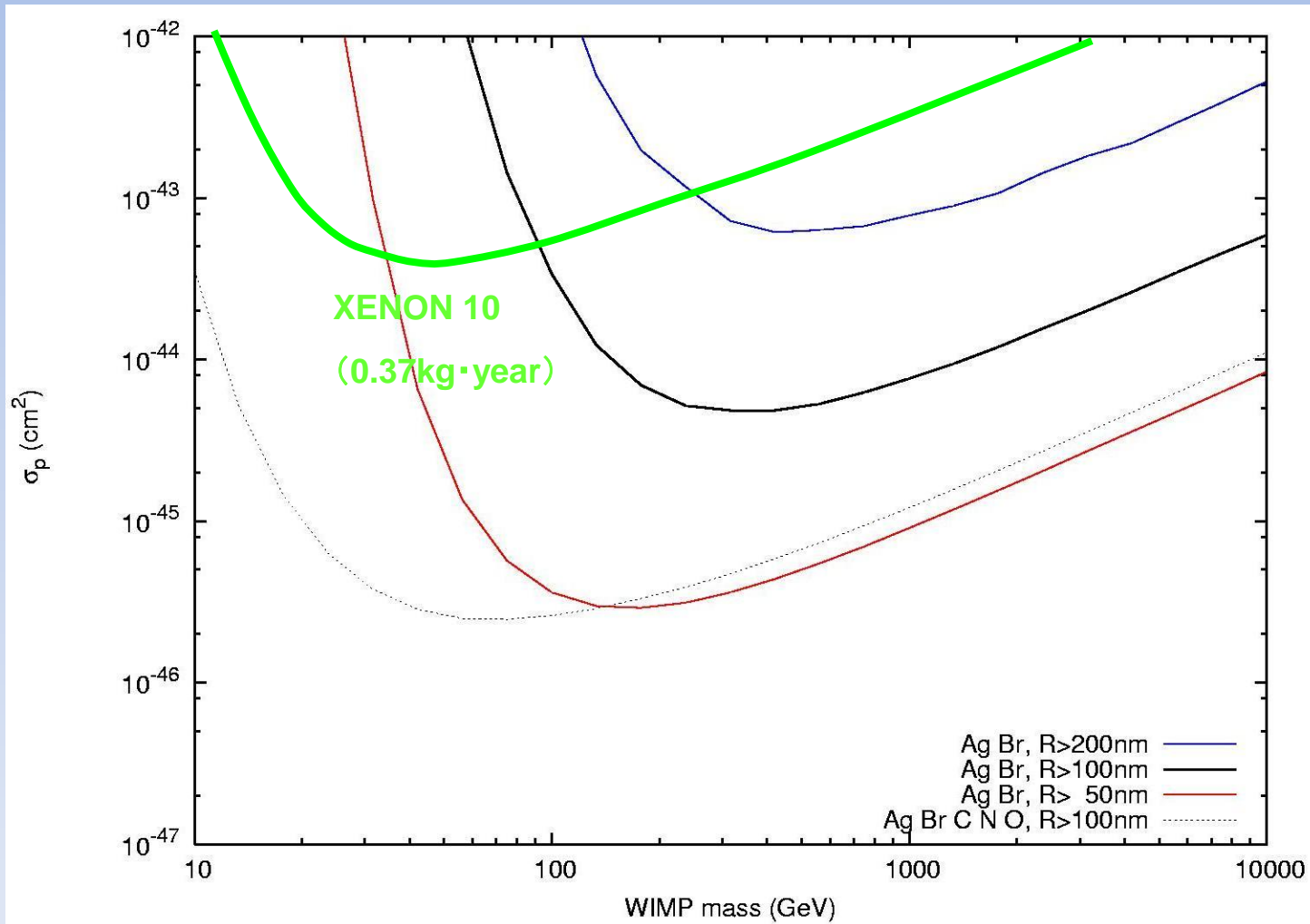


最初の目標:DAMA領域をdirectionalで検証

WIMP sensitivity for NIT

WIMPs event rate 1 counts/(1000kg year) limit

Range threshold



Summary

- 高分解能原子核乾板NITを開発
- 世界で唯一のdark matterの方向検出可能なsolid detector
- 開発要素
 - 1 μ m以下の飛跡読み出し
 - background rejection (現状でelectronに対して 10^{-5})
- 乳剤製造facilityの建設によって定常的な生産と開発が可能となる
- まずはDAMA領域の探索が目標
- 将来的に数トンのdark matterの方向検出を目指す