

Noble Gas detector for $0\nu\beta\beta$ experiment

A.K.Ichikawa

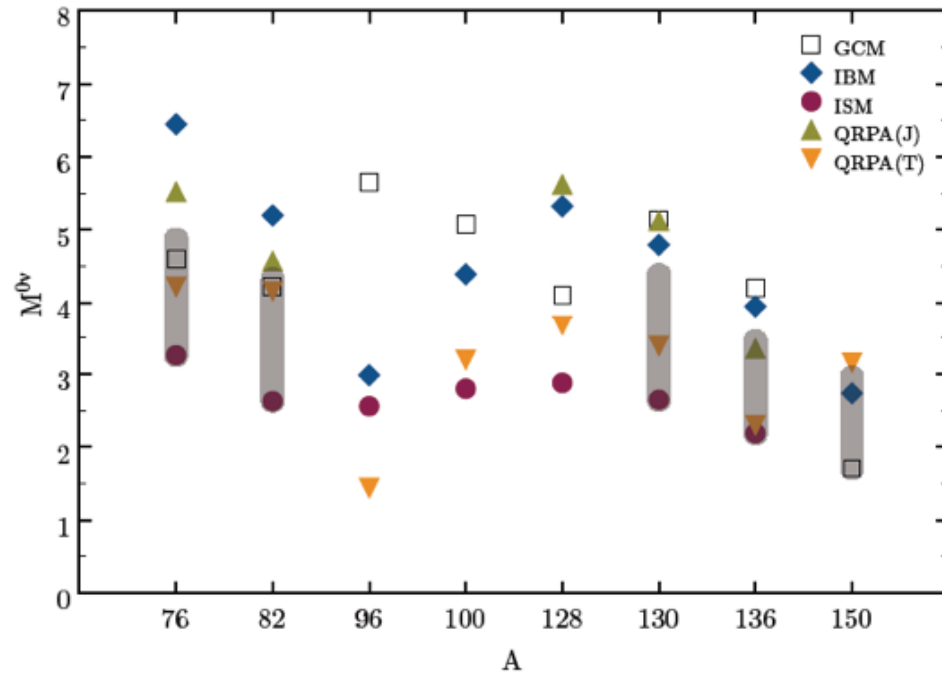
- 高いエネルギー分解能(<1%(FWHM))で、電子のトラックが見える検出器。
- 1tonを容易に得ることができるソース。
- ソースと検出器は別とする。→フォイルソース。
- Ionization chamberまたはpromotional counterを考える。
- 磁場をかけると、 β と $\beta\beta$ の区別がつくが、大変なのでとりあえず考えない。

Isotopes

	abound(%)	$\tau(2\nu\beta\beta)$ yr	Q(keV)	$Q^5/1E16$	$Q^5 \times \tau(2\nu\beta\beta)/1E36$	
48Ca	0.187	3.9E+19	4271	142.12	55.4	enrichment difficult
76Ge	7.8	1.7E+21	2039	3.52	59.9	
82Se	9.2	9.6E+19	2995	24.10	23.1	
96Zr	2.8	2.0E+19	3350	42.19	8.4	
100Mo	9.6	7.1E+18	3034	25.71	1.8	
110Pd	11.8		2013	3.31		
116Cd	7.5	2.8E+19	2802	17.27	4.8	
124Sn	5.64		2228	5.49		
130Te	34.5	7.6E+20	2529	10.35	78.6	
136Xe	8.9	2.2E+21	2479	9.36	208.8	
150Nd	5.6	9.2E+18	3367	43.27	4.0	enrichment difficult

* $\tau(2\nu\beta\beta) \propto Q^{11}$, $\tau(0\nu\beta\beta) \propto Q^5$

Isotopes



NME must be as high as possible.

- Best case: Ge-76
- Worse case: Nd-150
- According to PMR: all quite close

J.J. Gómez-Cadenas, neutrino summer school 2011

	Source			Energy resolution
KamLAND-zen	^{136}Xe	320kg (90%enriched)	scintillation	4.1%(σ) @2.6 MeV
EXO-200	^{136}Xe (Liquid)	175kg (81%enriched)	Ionization& scintillation	1.6%(σ) @2.6MeV
CUORE	^{130}Te	1 ton TeO_2 (a.i. 34%)	bolometric	0.3%(FWHM) @2.5MeV
GERDA	^{76}Ge	14.6kg (enriched)	Germanium semiconductor	0.22%(FWHM) @2.0MeV
SuperNEMO	^{82}Se	100kg	Drift chamber &calorimeter	4%(FWHM) @3MeV
NEXT	^{136}Xe (10atm)	100kg(enriched)	Ionization& scintillation	0.5-1%(FWHM) @2.6MeV

ソース

^{82}Se

- $\tau(2\nu\beta\beta)$ is long. $9.6 \times 10^{19}\text{yr}$
- 半金属
- セレンの産出量 2,260ton/yr。埋蔵量 88kton

^{100}Mo

- $\tau(2\nu\beta\beta)$ is short. $7.1 \times 10^{18}\text{yr}$
- 金属なので薄膜電極になる
- モリブデンの産出量 230,000ton/yr。埋蔵量 9800kton
- $\rho = 10.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \rightarrow 21\mu\text{m}$ で $dE = 0.03\text{MeV loss}(*)$
 - $54\text{g}/(50\text{cm}\times 50\text{cm})$ 18,519枚/1トン

^{116}Cd

- カドミウムの産出量 22,000ton/yr。埋蔵量 660kton

^{130}Te

- テルルの産出量 125トン。埋蔵量 22kton

^{136}Xe

- キセノンの産出量 $5000\text{-}7000\text{m}^3/\text{yr} \sim 50\text{ton}$ (1998年) 大気中には $2 \times 10^6 \text{ kton}$

* $dE/dx = 1.4\text{MeV}\cdot\text{g}^{-1}\text{cm}^2$ を仮定

property of noble gases

	Density at 0°C,1atm (g/L)	Liquid Density (g/cm ³)	Melting point(K)	Boiling point(K)
He	0.1786	0.145	-	4.22
Ne	0.9002	1.2	24.56	27.07
Ar	1.784	1.398	88.80	87.30
Kr	3.749	2.413	115.79	119.93
Xe	5.894 (2.7E19 atom/cm ³)	3.053	161.4	165.03

Range of electron

$$R_{\text{ex}} = 542E - 133 \quad : \quad E > 0.8 \text{ MeV}$$

$$R_{\text{ex}} = 407E^{1.38} \quad : \quad 0.15 < E < 0.8 \text{ MeV}$$

Note: 出展忘れた。ガスでも正しいか要確認

Energy	Range (mg/cm ²)	Range					
		gas at 1atm, 0°C) (m)			Liquid (cm)		
		He	Ar	Xe	He	Ar	Xe
122 keV	22	1.23	0.12	0.04	0.15	0.02	0.01
662 keV	230	12.88	1.29	0.39	1.59	0.16	0.08
1.33 MeV	588	32.92	3.30	1.00	4.06	0.42	0.19
2.529 MeV	1240	69.43	6.95	2.10	8.55	0.89	0.41
3 MeV	1493	83.59	8.37	2.53	10.30	1.07	0.49

Table 5.1 Values of the Energy Dissipation per Ion Pair (the *W*-Value) for Different Gases^a

Gas	First Ionization Potential (eV)	<i>W</i> -Value (eV/ion pair)	
		Fast Electrons	Alpha Particles
Ar	15.7	26.4	26.3
He	24.5	41.3	42.7
H ₂	15.6	36.5	36.4
N ₂	15.5	34.8	36.4
Air		33.8	35.1
O ₂	12.5	30.8	32.2
CH ₄	14.5	27.3	29.1

^aValues for *W* from ICRU Report 31, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair," International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC, 1979.

A.O.Allen, Drift Mobilities and Conduction Band Energies of Excess Electrons in Dielectric Liquids

TABLE 1. Zero-field mobility of electrons (or negative ions) in condensed phases of elements and diatomic gases

Substance	State	$\mu_-, \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	T, K	Temp. effect, equation	Temp. range, K
He	liq.	0.020	4.2	See fig. 1	0.274-5.18
Ne	solid	600.	25.	—	—
	liq.	0.0016	25.5	$\mu_- = 3.0 \times 10^{-4}T + 0.0070$	26-31
	liq.	0.0008	25.5	$\ln(\mu_- T) = 2.03 - (151/T)$	25.5-43
Ar	solid	1000	82	—	—
	liq.	475	85	—	—
	liq.	470	90.1	See fig. 2	90-160
Kr	solid	3700	113	—	—
	liq.	1800	117	—	—
	liq.	1300	120	See fig. 5	120-180
Xe	solid	4500	157	—	—
	liq.	2200	163	—	—
	liq.	1080	167	See fig. 6	167-315
N ₂ [*]	solid	0.0017	63	—	—
	liq.	0.00065	63	$\mu_- = 3.57 \times 10^{-5}T - 0.00160$	63-77
O ₂ [*]	liq.	0.00045	62	$\mu_- = 3.70 \times 10^{-5}T - 0.00185$	62-89
CO [*]	solid	0.003	68	—	—
	liq.	0.00087	69	$\mu_- = 4.78 \times 10^{-5}T - 0.00242$	69-78
H ₂ [*]	liq.	0.0086	21	—	—
Sulfur [*]	liq.	0.000100	393	$E_{\text{activn.}} = 0.15 \pm 0.02 \text{ eV}$	393-433

*Interpretation of these data as electronic rather than ionic mobilities is quite doubtful; see text.

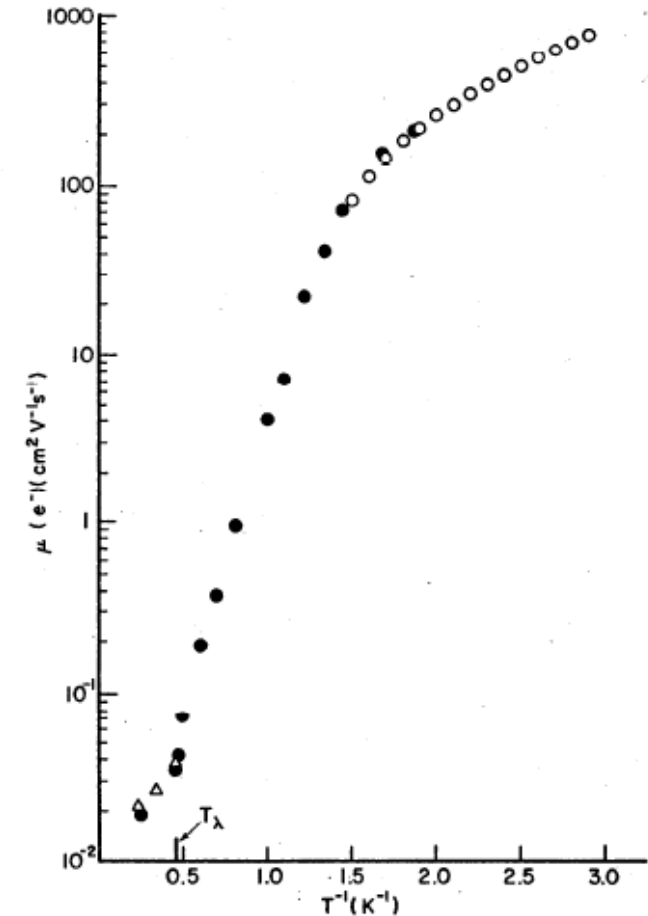


FIGURE 1. Mobility of electrons in liquid helium at pressures below 1 atm, plotted against reciprocal absolute temperature: open circles [729251]; closed circles [6000073]; open triangles [620159].

密度的には、液体ヘリウムが魅力的だが、液体Heでは、electronがドリフトしない！！！！

- Ar(ガス)をSTPに対して40倍の密度で使うことを考える。
- Arを使うメリット: 無尽蔵に手に入る！
- Arを使うデメリット: バックグラウンドソースを含む。
- 3MeV電子の飛程が~210mmなので、10~30mm程度の segmentation で読み出し、 dE/dX を測る。
 - α 粒子は、確実に落とせる。
 - γ もかなり落とせる。
 - dE/dX で β を落とせるか？ (need study!!)
- Volumeを考えるとLiq. Arも魅力的。その場合は、trackingとは別の識別法が必要。(scintillation光?)。オプションとして、完全には捨てない。

Energy	Range (mg/cm ²)	Range	
		gas at 1atm,0°C) (m)	Gas at 40 atm(0°C) (mm)
122 keV	22	0.12	3.1
662 keV	230	1.29	32.2
1.33 MeV	588	3.30	82.4
2.529 MeV	1240	6.95	173.8
3 MeV	1493	8.37	209.2

Ionization v.s. Proportional

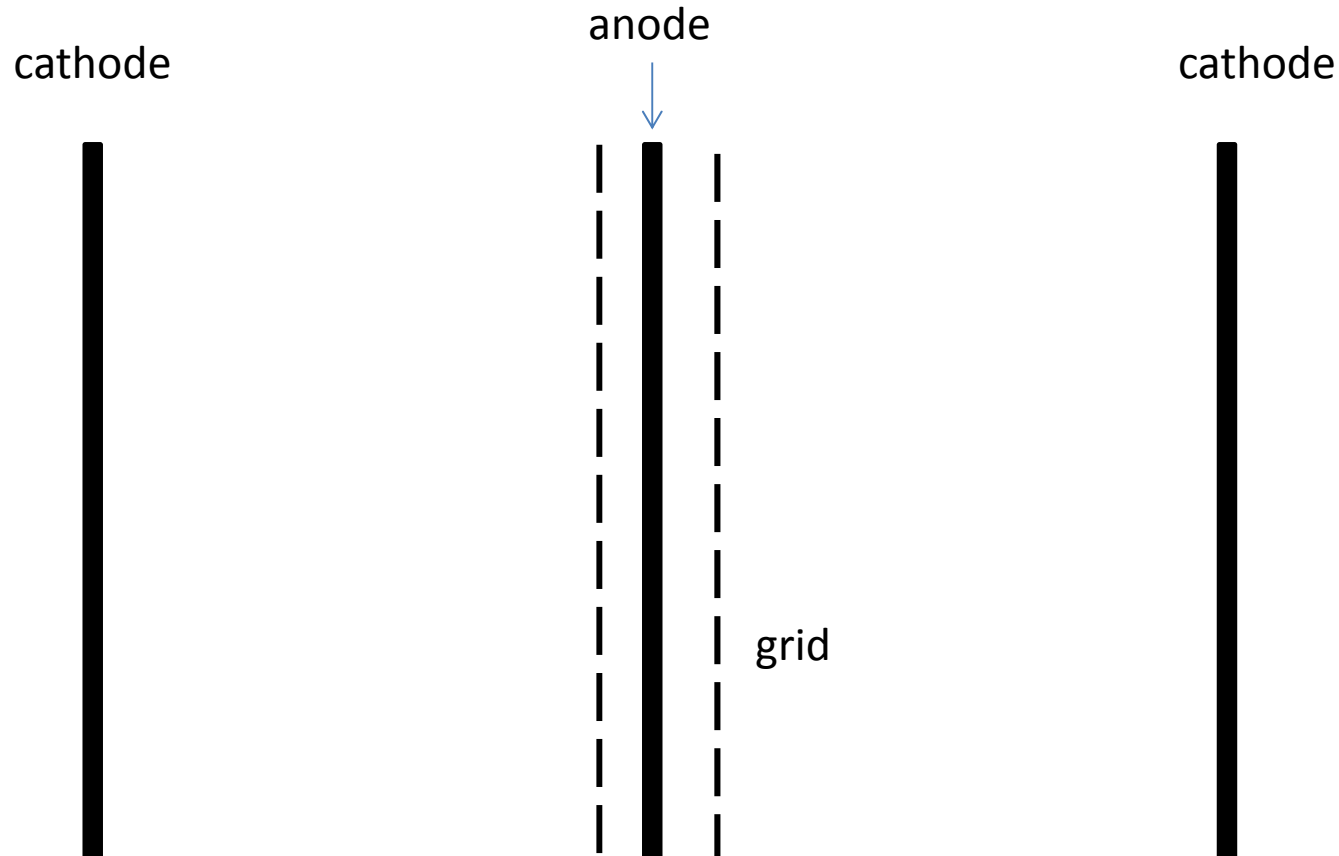
✓ Ionization

- Ultimate resolution
- Signal is very small → Need fancy (and cooled) preamp
- Simple electrode

✓ Proportional

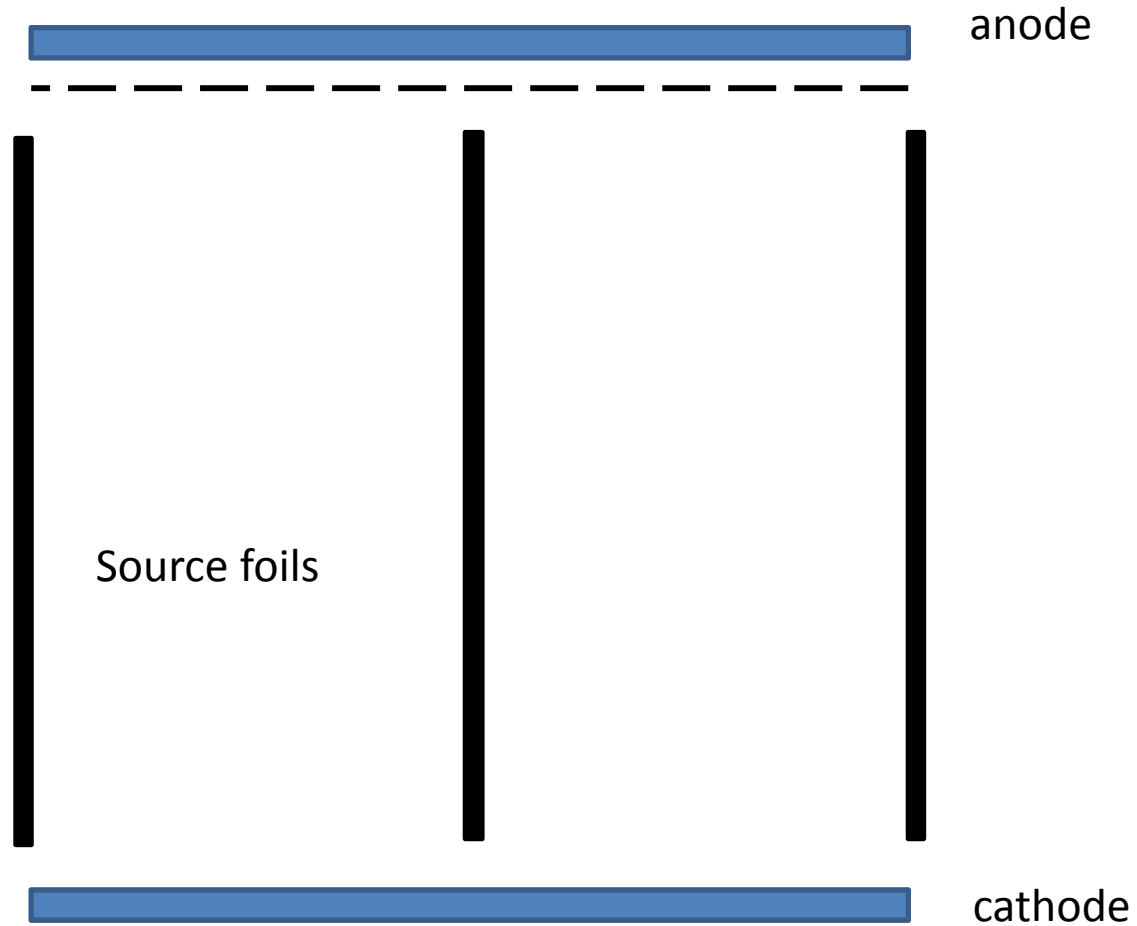
- x100 to keep energy resolution → normal preamp for semiconductor
- Wire or micropattern gas detector
- strong dependence of multiplication factor on environment (gas pressure, HV, wire) → bad influence on energy resolution

Ionization option metal foil case

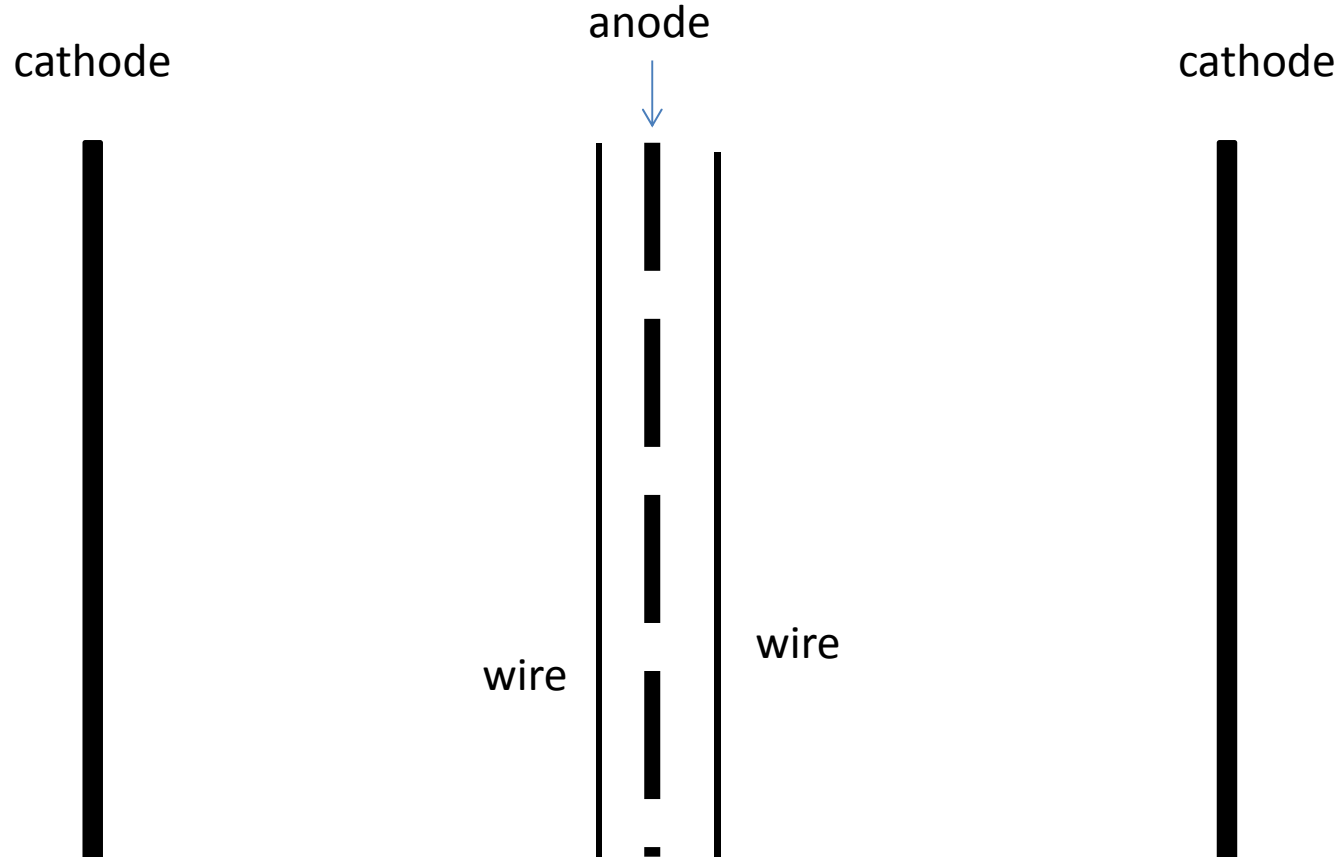


- ✓ Anode, cathodeは、ソースフォイルで作る。
- ✓ Gridをsegment (X, Y両方向)して、trackingにできないか？ (時間情報も使って3D reconstruction)
- ✓ Anodeを、低ノイズpreampで読み出す。

Ionization Option non-metal case

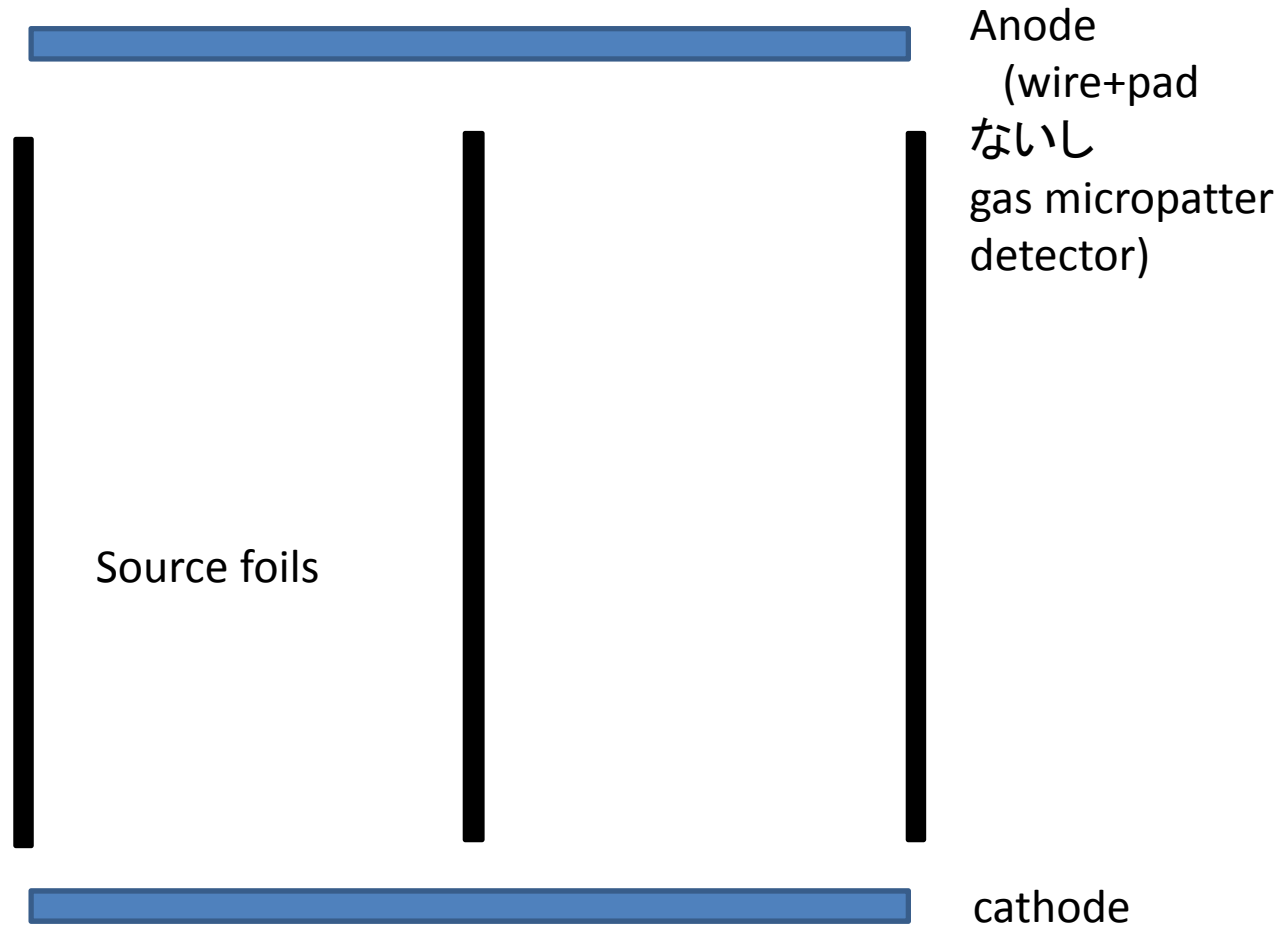


proportional option metal foil case

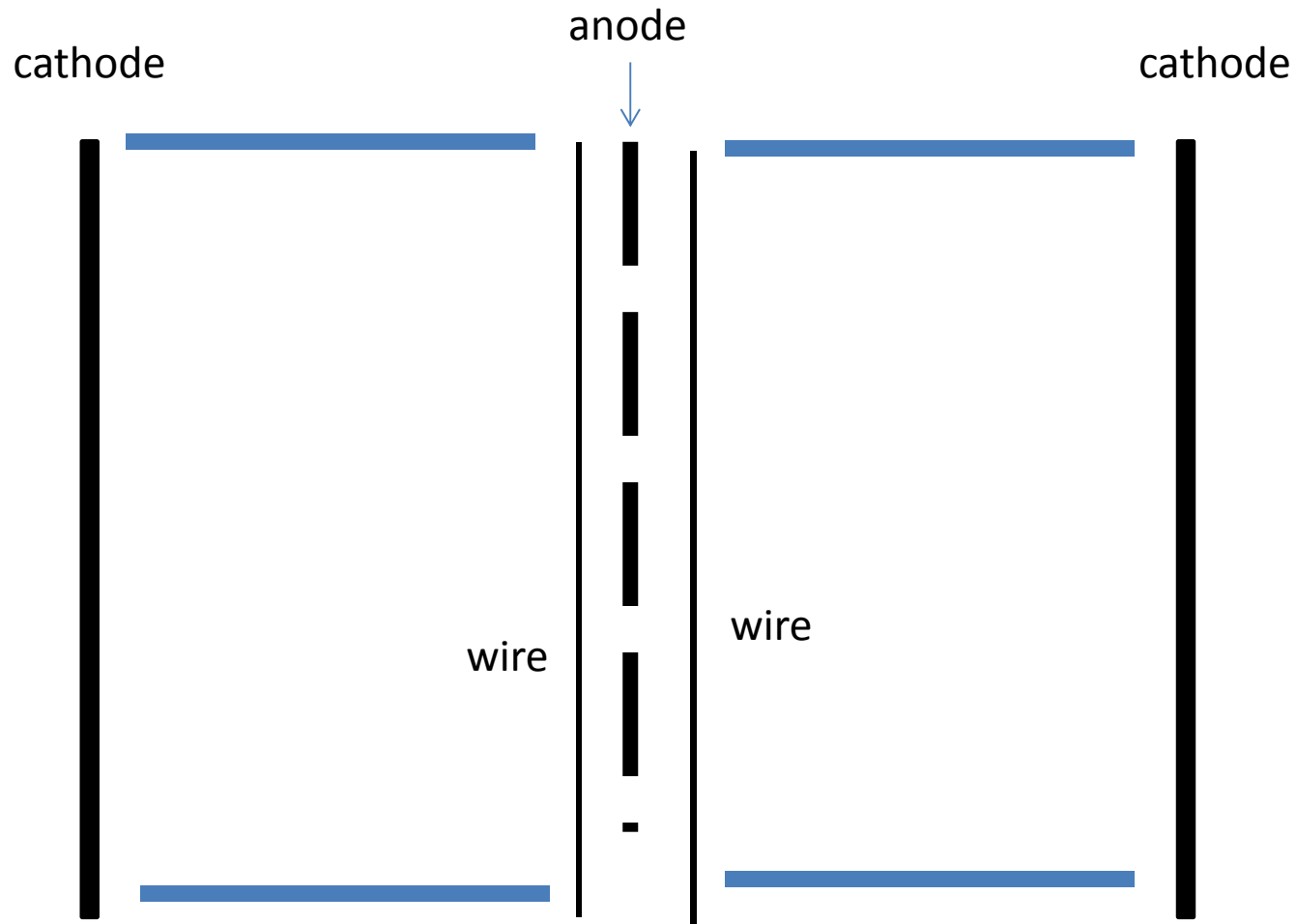


- ✓ Anode, cathodeは、ソースフォイルで作る。
- ✓ Anodeを、wireと直行させてsegment

Proportional Option non-metal case



Metal, non-metal combination?



- ✓ 4側面に非金属フォイル
- ✓ 同じ読み出し数でフォイル数、倍増

How to achieve x40 dense gas

- 40気圧
 - 高圧タンク。ちょっと怖い
 - 1気圧 低温 (~4.7K + boiling point)
 - クライオスタットが必要
 - Non metal foilだと、こんな低温でもたない？
- * Ionization modeの場合、どうせpreampはかなり冷やさないとはいけない。

Back ground

- $2\nu\beta\beta$
 - 分解能が1%だと、どれくらいの $\tau(0\nu\beta\beta)$ から問題になるのか、要勉強。
 - NEMO 3のpaperによると、

the region 2.8–3.2 MeV. For 10 kg of ^{100}Mo ($Q_{\beta\beta} = 3.035 \text{ MeV}$), one background event/year is expected from the $\beta\beta 2\nu$ process above 2.8 MeV. As

結構、きびしいな、 ^{100}Mo

- β 崩壊
 - $^{42}\text{Ar} \rightarrow ^{42}\text{K} \rightarrow ^{42}\text{Ca}$ で $Q_{\beta}=3.5 \text{ MeV}$ の β 崩壊
 - ^{214}Bi ($Q_{\beta}=3.2 \text{ MeV}$), ^{208}Tl ($Q_{\beta}=5.0 \text{ MeV}$)
 - NEMO3のペーパー(秋山君research)によると、(i) 内部転換電子を伴う β 崩壊、(ii) β 崩壊した電子のMoller散乱、(iii) 励起状態への β 崩壊にともなう γ のcompton散乱がバックグラウンドになりうる。これらは電子2個なので dE/dX では落とせない。ううむ。

- x40 Gasの場合は、proportional modeで1%(FWHM)のエネルギー分解能を目指すのがいいのではないだろうか。
- Liquid Arで、ionization modeで0.2%(FWHM)というのも魅力的ではある。