

電子陽電子対消滅放射から探る 銀河系内宇宙線源

Ref.)

Ohira, Kohri & NK 2012, MNRAS, 421, L102

NK, Ioka & Nojiri 2010, ApJ, 710, 958

NK, Ioka, Ohira & Kashiyama 2011, ApJ, 729, 93

Kashiyama, Ioka & NK, 2011, Phys. Rev. D, 83, 023002

Kisaka & NK, 2012, MNRAS, 421, 3543

NK et al. 2017 in prep.

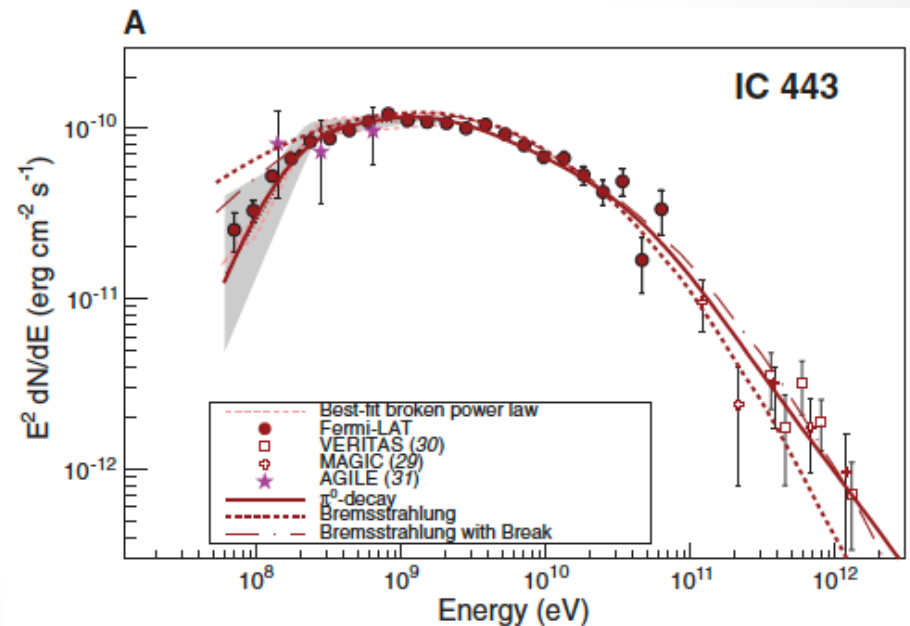
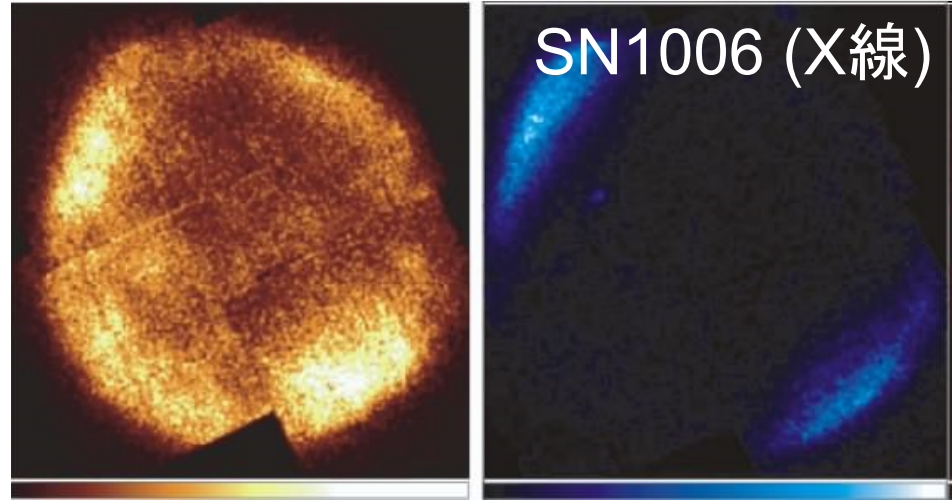
川中 宣太 (白眉センター/宇宙物理学教室)

Motivation



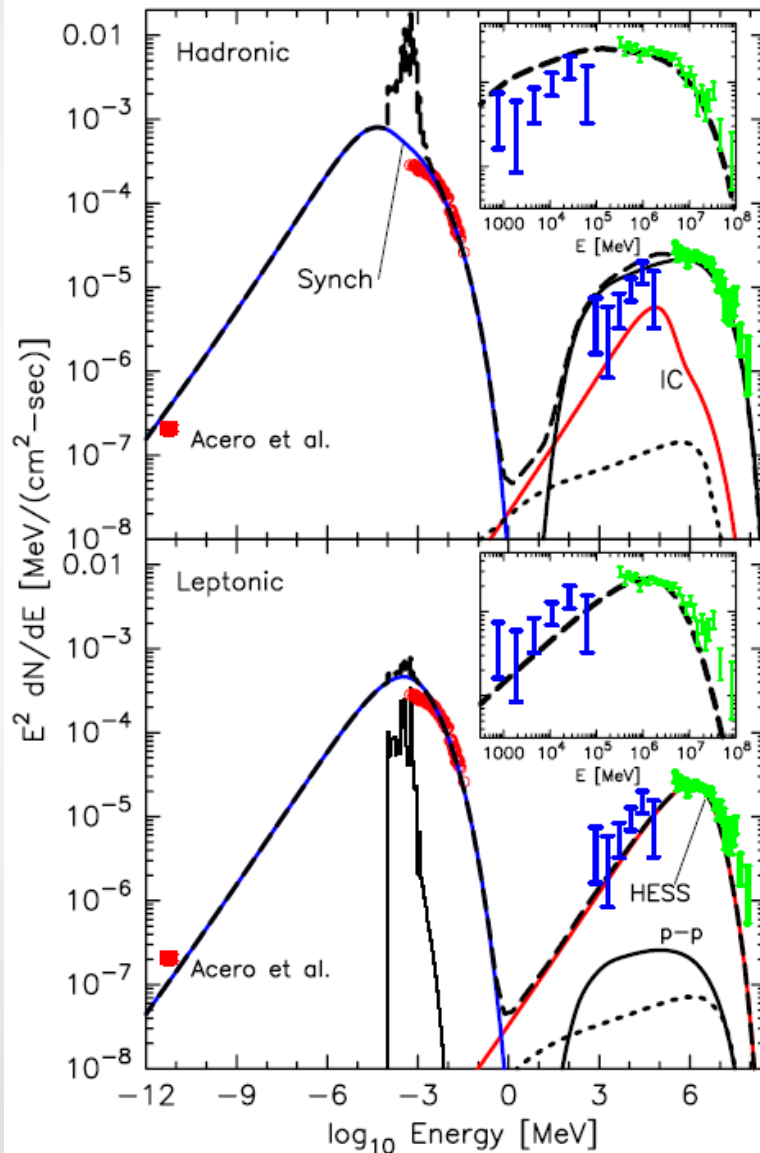
(1) 銀河系内宇宙線の起源 ~ 超新星残骸

- 超新星爆発後、高速 ($\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$) で膨張する高温ガス
- 星間物質と衝突、衝撃波を形成
- 粒子が衝撃波の上流と下流を往復 $\rightarrow$ 加速
- シンクロトン放射(X線) $\rightarrow$ 電子加速の証拠 (Koyama+ 1995)
- ガンマ線の観測 $\rightarrow$ 陽子加速の証拠 (Ackermann+ 2013)



超新星残骸からのガンマ線

RXJ1713 (Ellision+ 2010)

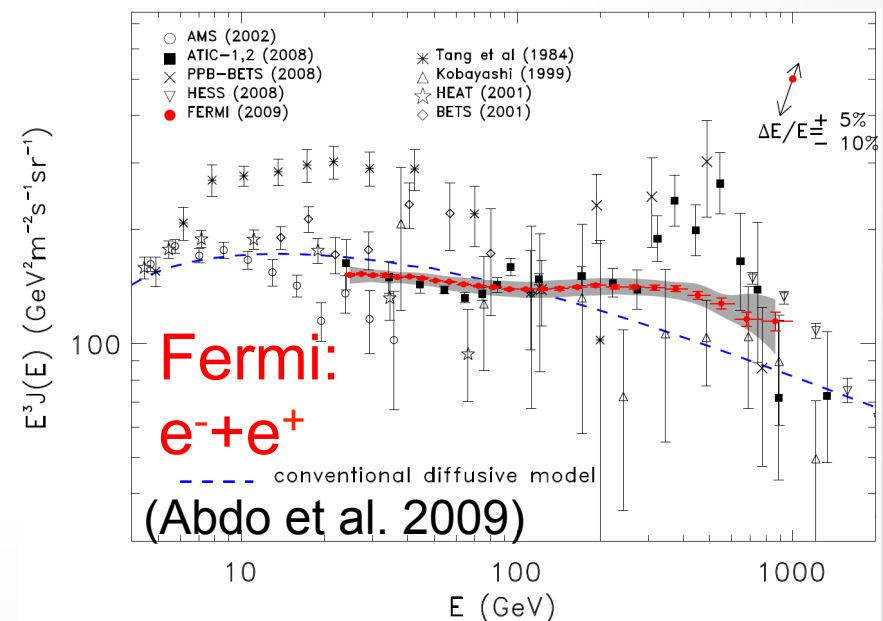
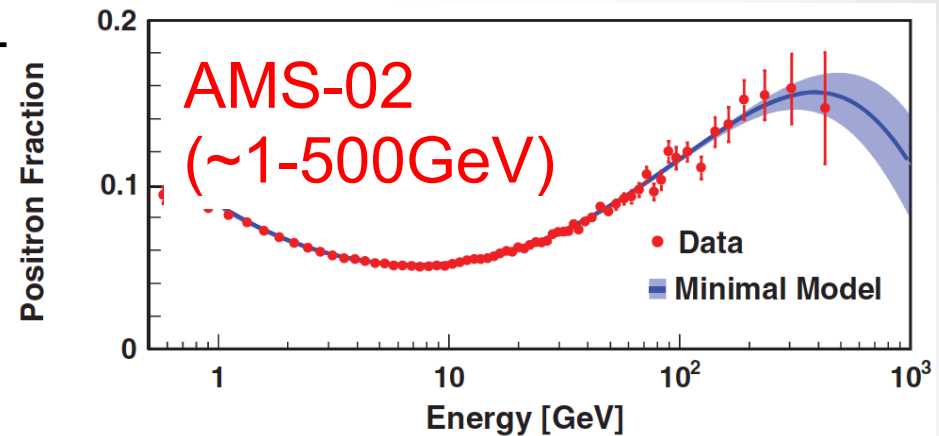


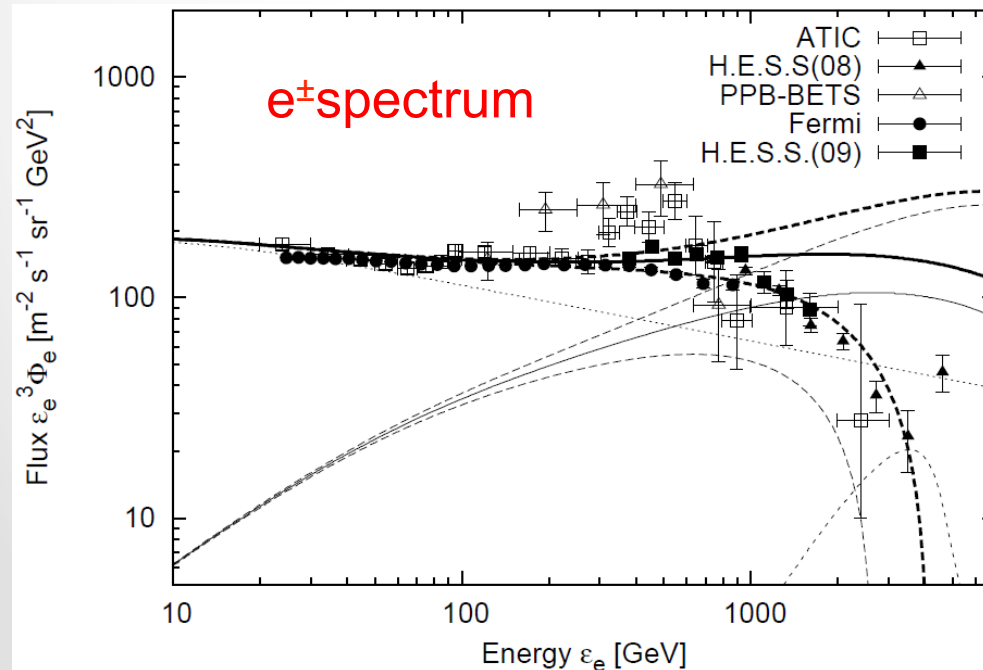
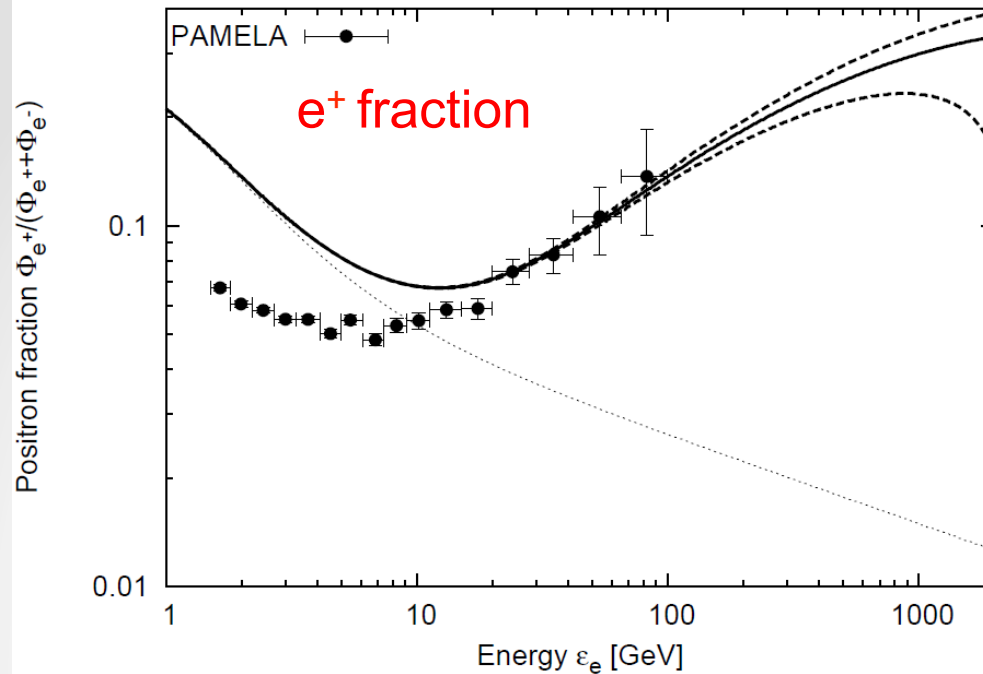
- $pp \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (hadronic scenario)で説明可能
- しかし、非熱的電子の bremsstrahlung/inverse Compton scattering (leptonic scenario)の可能性も
- どうやって区別？
- ... $pp \rightarrow \pi^\pm$ 由来の粒子の検出

1. ニュートリノ (ν_μ, ν_e)
2. 陽電子 (e^+) ← 対消滅放射 (511 keV)を見る

(2) 宇宙線電子・陽電子の起源

- 陽電子: 宇宙線陽子が伝搬中に星間物質との相互作用で作ると考えると、スペクトルは右下がりになるはず → 観測は右上がり
- 電子スペクトルも予想を超過 (Fermi/ATIC/PPB-BETS/HESS)
- 別の電子・陽電子源が存在？
- ダークマターの対消滅or崩壊？
- 天体 (PWN/SNR/BH) ？
- 将来の実験 (CALET, DAMPE, CTA etc.) でより強い制限が得られると期待





例 : NK, Ioka & Nojiri 2010

地球近傍の複数パルサー
から宇宙線電子・陽電子対
が放出されていると仮定す
ると、陽電子比と電子・陽
電子フラックスが自然に説
明できる

$$R \sim 1.5 \times 10^{-5} / \text{yr/kpc}^2$$

$$E_{e^+} = E_{e^-} \sim 10^{48} \text{ erg}$$

$$\alpha \sim 1.9$$

see also

Kashiyama, Ioka & NK 2011

NK, Ioka, Ohira & Kashiyama 2011

Kisaka & NK 2012

宇宙線電子・陽電子源の候補天体

- パルサー(磁気圏・PWN)

Shen 70; Aharonian+ 95; Atoyan et al. 95; Chi+ 96; Zhang & Cheng 01; Grimani 07; Yuksel+ 08; Buesching+ 08; Hooper+ 08; Profumo 08; Malyshev+09; Grasso+ 09; NK, Ioka & Nojiri 10

- 超新星残骸

Shen & Berkey 68; Pohl & Esposito 98; Kobayashi+ 04; Shaviv+ 09; Hu+ 09; Fujita, Kohri, Yamazaki & Ioka 09; Blasi 09; Blasi & Serpico 09; Mertsch&Sarkar 09; Biermann+ 09; Ahlers, Mertsch & Sarkar 09

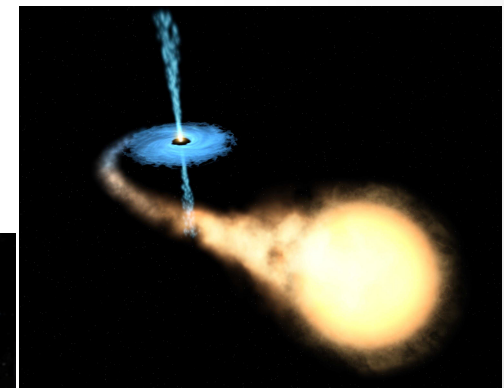
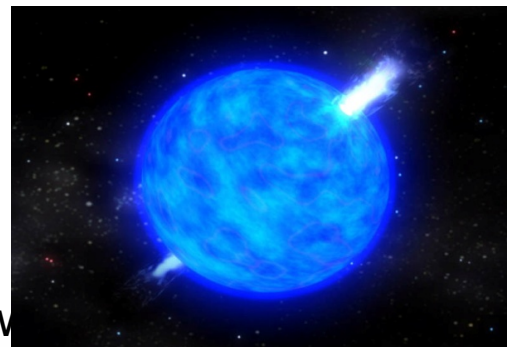
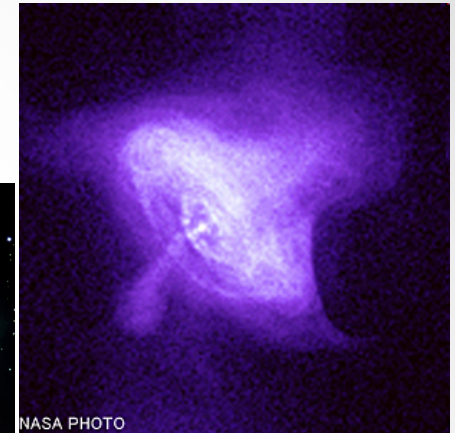
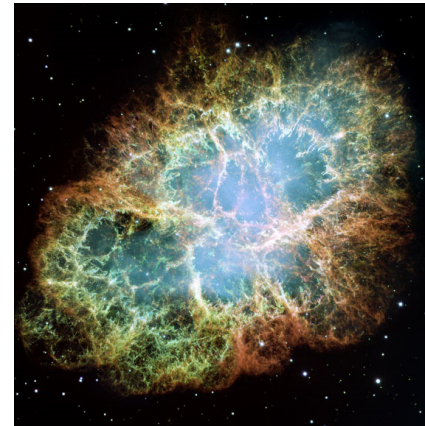
- マイクロクエーサー (系内BH)

Heinz & Sunyaev 02

- ガンマ線バースト Ioka 08

- 伝搬中の効果

Delahaye+ 08; Cowsik & Burch 09; Staw+09; Schlickeiser & Ruppel 09



検証法

- 非等方性

天体のある方向に強く出るはず

非常に検出が難しい

- 逆コンプトン散乱によるガンマ線

天体周辺を取り囲むように光るはず

電子・陽電子の区別つかない

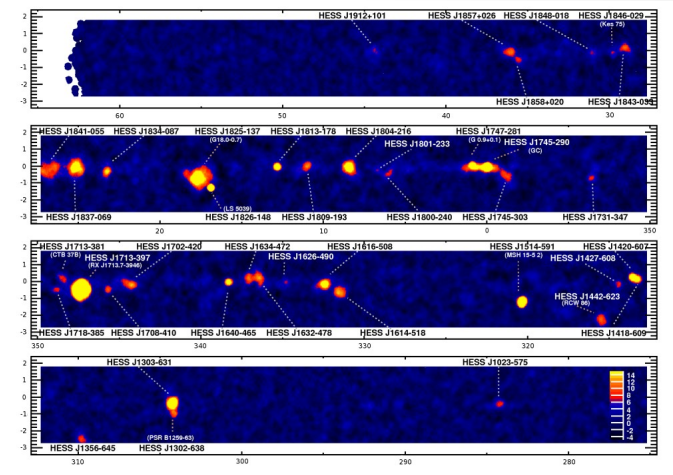
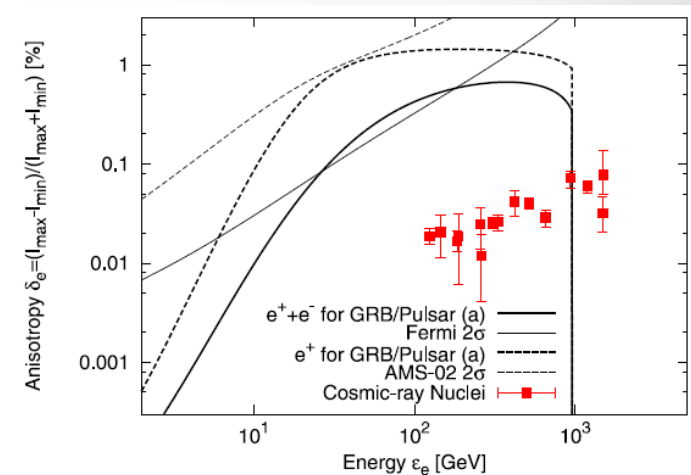
- 二次生成核のスペクトル

B/Cなどが e^+ と同様の傾向を示せばSNR中で
excessが作られていることの証拠になる

hadronic でなければそもそも見えない

- 対消滅放射

- 電子ではなく陽電子が出ている直接的証拠



About Positron Annihilation Emission

電子陽電子対消滅線放射とは？

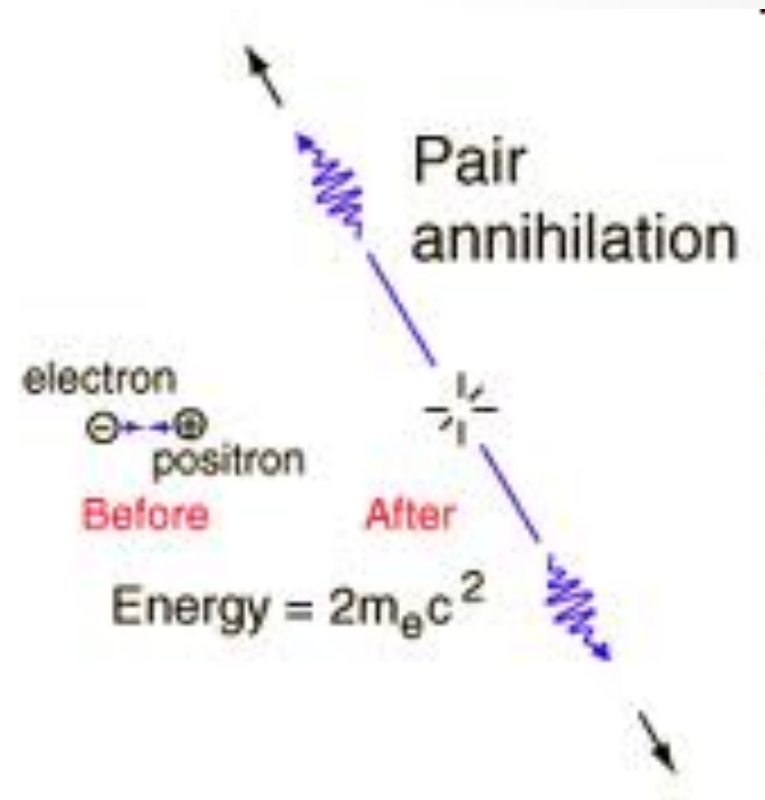
電子・陽電子が対消滅する
際に出る放射

($m_e c^2 = 511 \text{ keV}$)

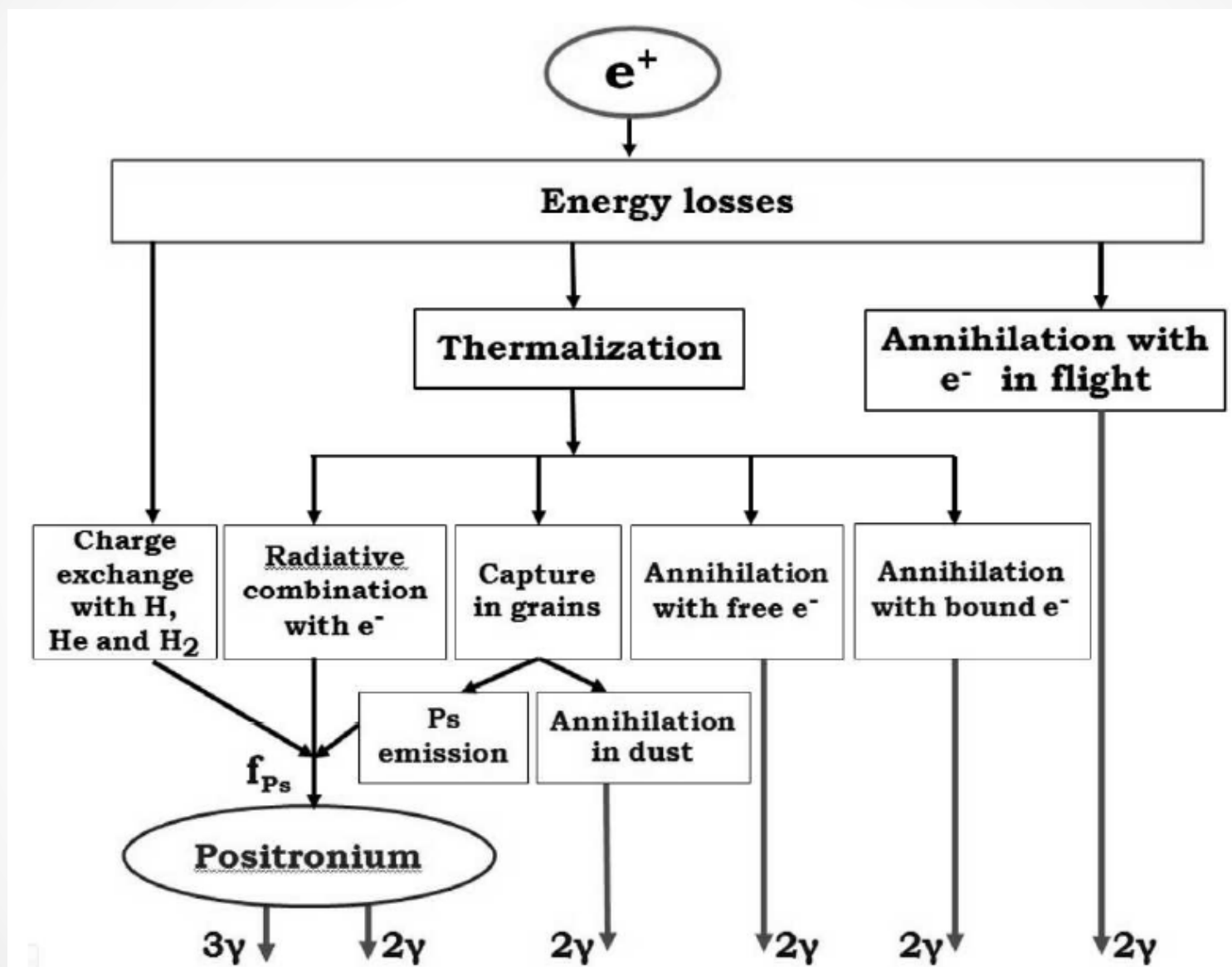
当然、陽電子が存在しなければ出ない

重心系が十分低速でなければラインとして見えない

→ 冷却する必要



対消滅に至るまで



対消滅に伴う放射

- e^+ と e^- が直接衝突する場合 → 511keV line
- Positronium (e^+ と e^- の束縛状態)を形成した場合は、

Para-positronium

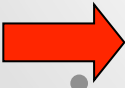
Antiparallel spin ($S=0$, singlet), 2-photon decay

Ortho-positronium

Parallel spin ($S=1$, triplet), 3-photon decay

$$I_{3\gamma} \propto \frac{3}{4} 3 f_{Ps}$$

$$I_{2\gamma} \propto 2(1 - f_{Ps}) + \frac{1}{4} 2 f_{Ps} = 2 - 1.5 f_{Ps}$$


$$f_{Ps} = \frac{8 I_{3\gamma}/I_{2\gamma}}{9 + 6 I_{3\gamma}/I_{2\gamma}}$$

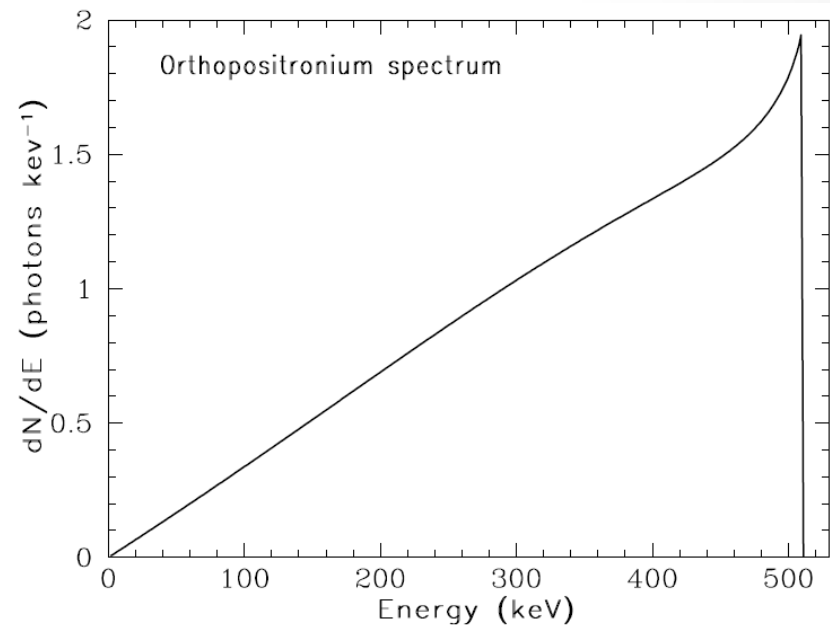
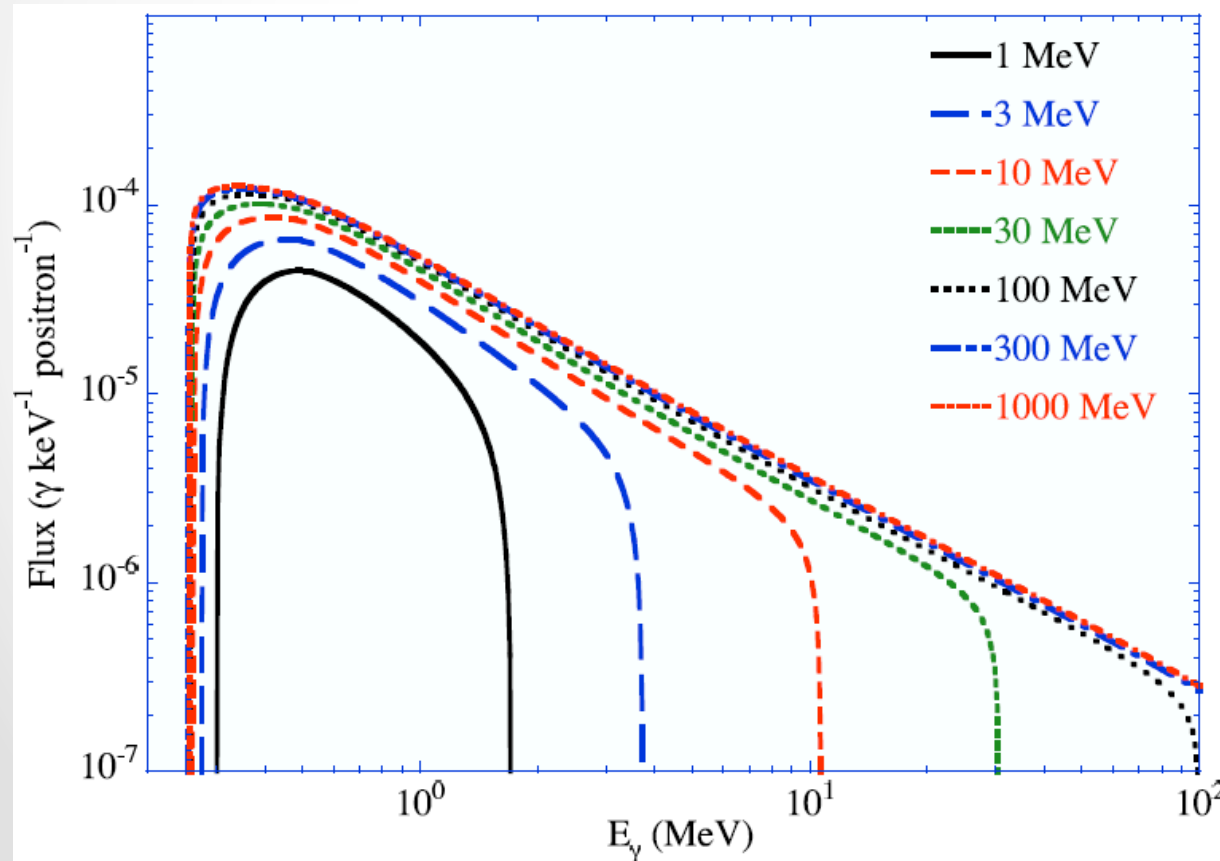


FIG. 1 Spectrum of ortho-positronium annihilation with the three-photon continuum (from Ore and Powell, 1949).

伝播中の対消滅 (MeV continuum)

十分冷え切る(<10keV)前に消滅して
ガンマ線を出すことも考えられる

断面積:
$$\sigma_a = \frac{\pi r_e^2}{\gamma + 1} \left[\frac{\gamma^2 + 4\gamma + 1}{\gamma^2 - 1} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - \frac{\gamma + 3}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \right]$$



陽電子のエネルギー

“Annihilation in flight”によるガンマ線のスペクトル

果たして実際に見えるのか？

SNRから見えるか？

Fermi sources: 分子雲と相互作用している、 pp 反応でガンマ線

→ e^+ が作られているはず

オーダー計算

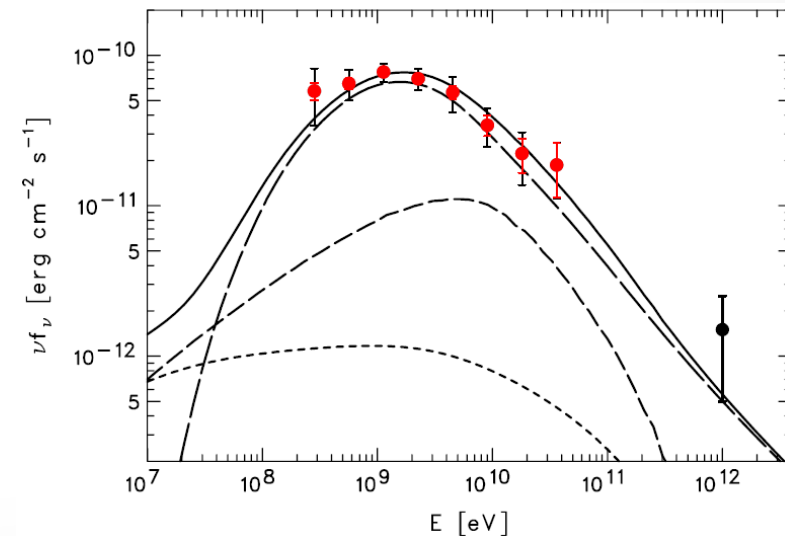
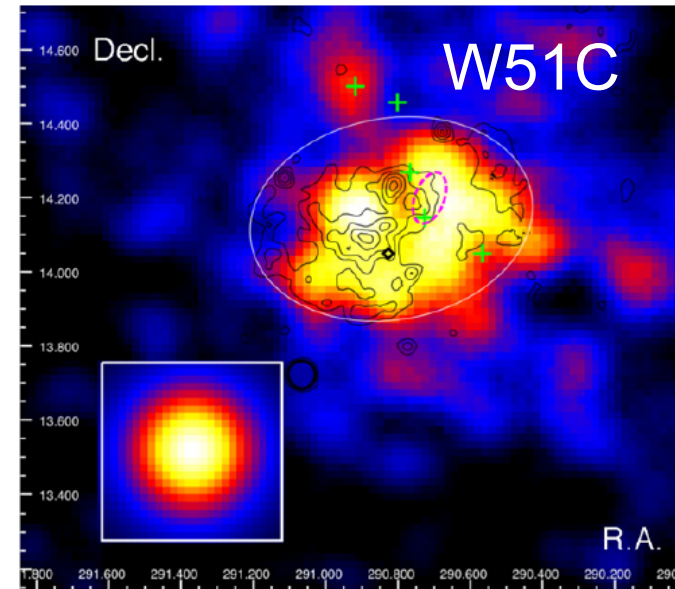
ガンマ線で見えているSNR

$$F_{>100 \text{ MeV}} \sim 10^{-7} - 10^{-6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

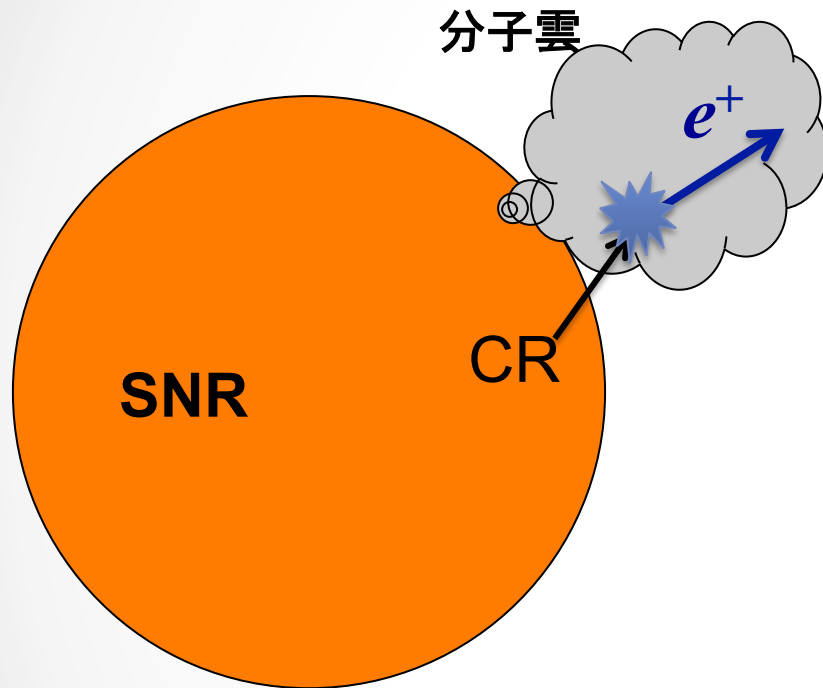
これらが全て hadronic origin だとすると、 e^+ も同じオーダーで生成

十分冷却されたとして、 $\sim 80\%$ が positronium を形成、うち $1/4$ が 2-photon decay

$$\rightarrow F_{511 \text{ keV}} \sim 10^{-8} - 10^{-7} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



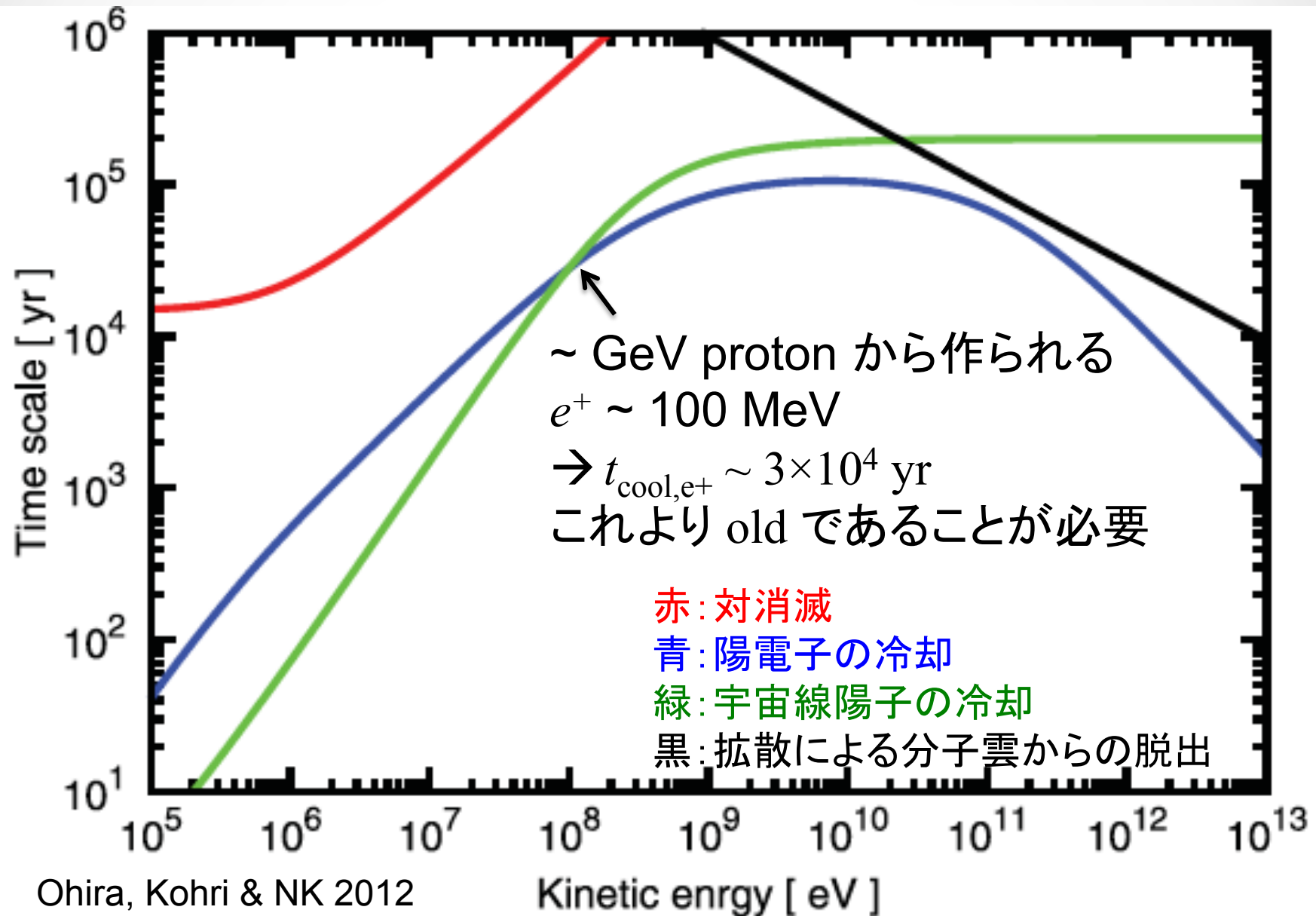
もう少し真面目に考えてみる



511 keV line が出るための必要条件

1. e^+ が生成されること
2. e^+ が十分冷却されていること (ionization, bremsstrahlung, synchrotron, inverse Compton scattering)
3. 対消滅・分子雲からの脱出より冷却のほうがタイムスケールが短いこと

主要なタイムスケール



陽電子からの放射の計算方法

各粒子 (p, e^-, e^+)の分布関数を求める

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial E} [\dot{E}(E)f] + \frac{f}{\tau_a(E)} + \frac{f}{\tau_d(E)} = Q(t, E),$$

$\dot{E}(E)$: 単位時間あたりのエネルギー損失 (sync., IC, brems., ionization,...)

τ_a : 対消滅のタイムスケール

τ_d : 拡散により脱出するタイムスケール

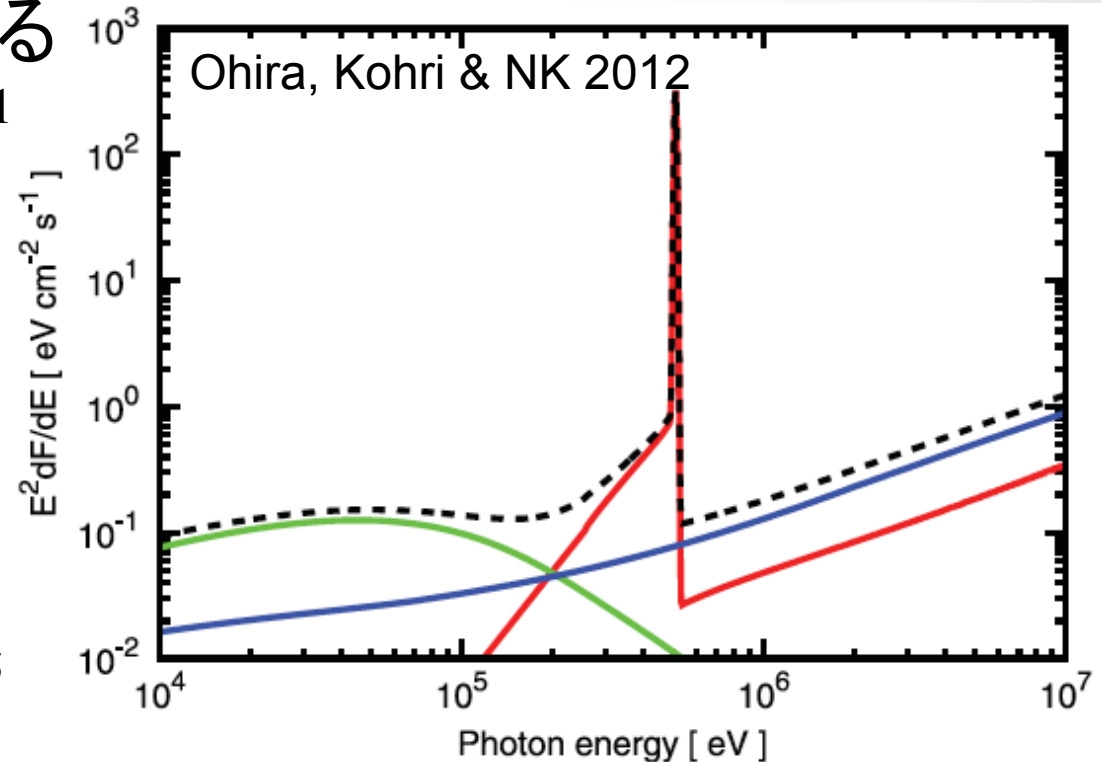
$Q(t, E)$: source term

$Q_p(t, E)$: power-law ($s = 2.8$) $\rightarrow f_p(t, E) \rightarrow Q_+(t, E)$
 $\rightarrow f_+(t, E) \rightarrow Q_{Ps}(t) = \left| \dot{E}(100 \text{ eV}) \right| f_+(t, 100 \text{ eV})$
 $\rightarrow F_{511\text{keV}}(t) = Q_{Ps}(t) \times 1/4 \times 2 / (4\pi d^2)$

結果

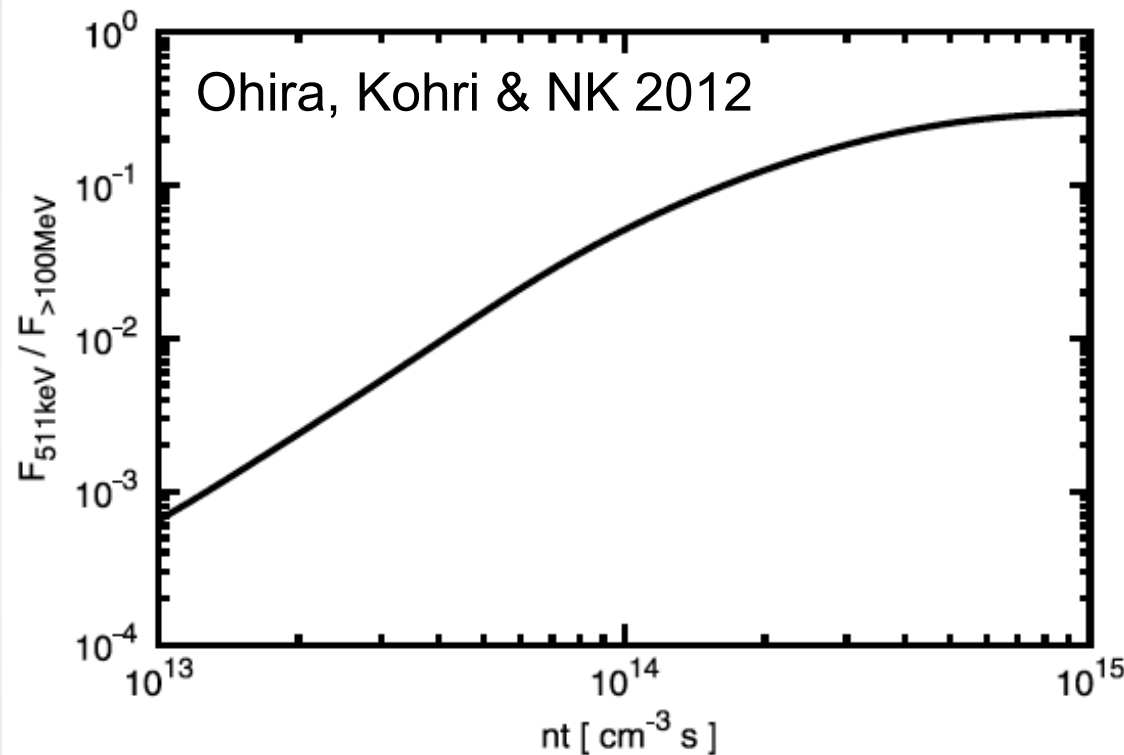
ガンマ線観測で見えている
 $F_{>100 \text{ MeV}} > 10^{-6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
であるような SNR を仮定

$$\left[\begin{array}{l} n = 300 \text{ cm}^{-3} \\ t = 3 \times 10^4 \text{ yr} \\ R_c = 30 \text{ pc} \\ B = 30 \text{ } \mu\text{G} \\ D = 10^{26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} (E/10 \text{ GeV})^{0.5} \end{array} \right.$$



- 連続成分を dominate
- e^+ annihilation (positronium emission and “annihilation in flight”; red)
 - brems. from secondary $e^\pm$ (blue)
 - brems. from CR protons (green)

511 keV flux はどれくらい強くなれる？



対消滅線放射強度は
 nt (=density $\times$ age)で
決まる ($\because e^+$ cooling
rate $\sim n$, 十分coolし
たものから
positronium 形成して
line 放射)
十分 old だと強度は
saturate



ガンマ線で見えているようなSNRでは
 $F_{511\text{keV}} < \sim 10^{-7} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度
(e-ASTROGAMではきつい...)

Pulsarから見えるか？

べき > 1 なら $e^\pm$ の個数は最低エネルギー $\varepsilon_{e,\min}$ によって決まる

NK et al. 2010 で仮定したべき 1.9, $\varepsilon_{e,\max}=10\text{TeV}$, $E_{e,\text{tot}}=10^{48}\text{erg}$
と適当に選んだ $\varepsilon_{e,\min}=10\text{MeV}$ を用いると、

パルサー1個あたりから期待される陽電子の数は $\sim 2 \times 10^{51} e^+$

($\varepsilon_{e,\min}=100\text{MeV}$ とすると $\sim 3 \times 10^{50} e^+$)

パルサーの寿命を $\sim 10^4\text{yr}$ とすると、

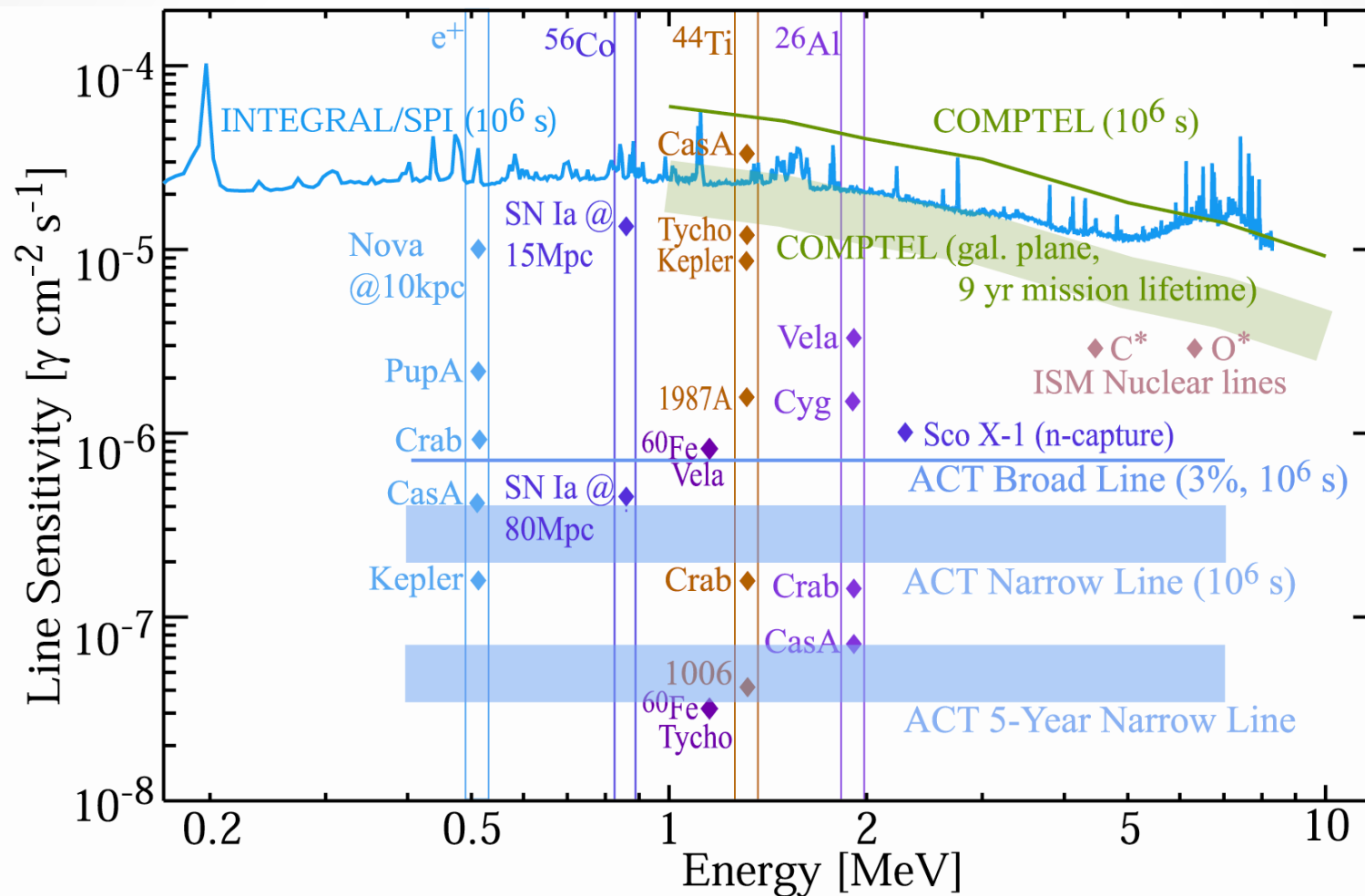
$$\dot{N}_{e^+} \sim 7 \times 10^{39} e^+ s^{-1} \left(\frac{\tau}{10^4 \text{yr}} \right)^{-1} \quad (\varepsilon_{e,\min}=100\text{MeV} \text{ならこれより} \sim 1 \text{桁小})$$

これが全てpositroniumを作ると仮定すると、ラインフラックスは

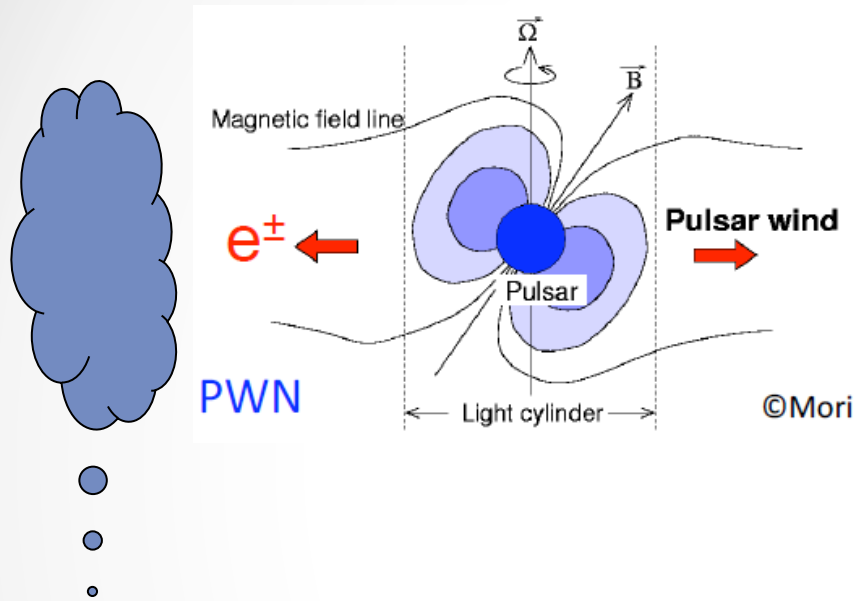
$$F_{511\text{keV}} = 2 \times \frac{1}{4} \times \dot{N}_{ps} \times \frac{1}{4\pi d^2} \sim \underline{3.6 \times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}} \left(\frac{\tau}{10^4 \text{yr}} \right)^{-1} \left(\frac{d}{3\text{kpc}} \right)^{-2}$$

Nuclear Line Sensitivity

Primary science requirement: systematic study of SNIa spectra, lightcurves to uniquely determine the explosion mechanism, ^{56}Co (0.847 MeV) abundances.



冷却できるか？



超新星残骸も分子雲と相互作用しているものがあるのだから、パルサーも傍に分子雲を持つものがあるのは自然？

例: G189.22+2.90 (IC443), PSRJ1833-827 (W41)

単純なモデル

positroniumを形成するために何か e^+ を冷やすものが必要。

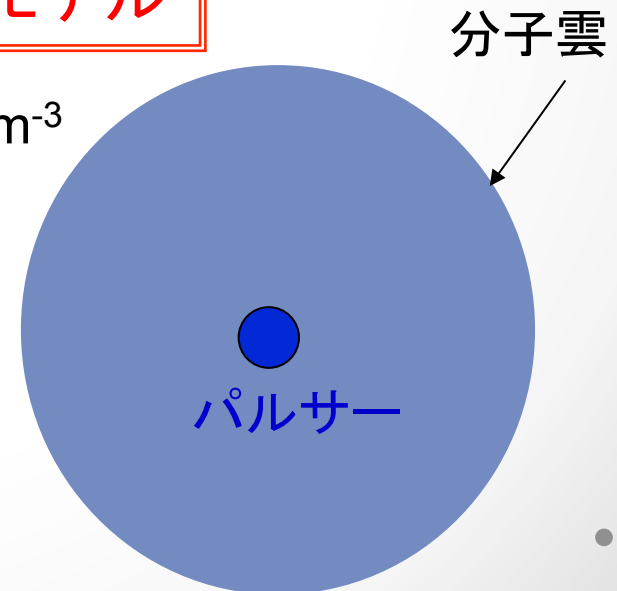
分子雲？ ($\sim 10^{2-3} \text{ cm}^{-3}$)

(accretion-poweredの場合は) 伴星からのwind?

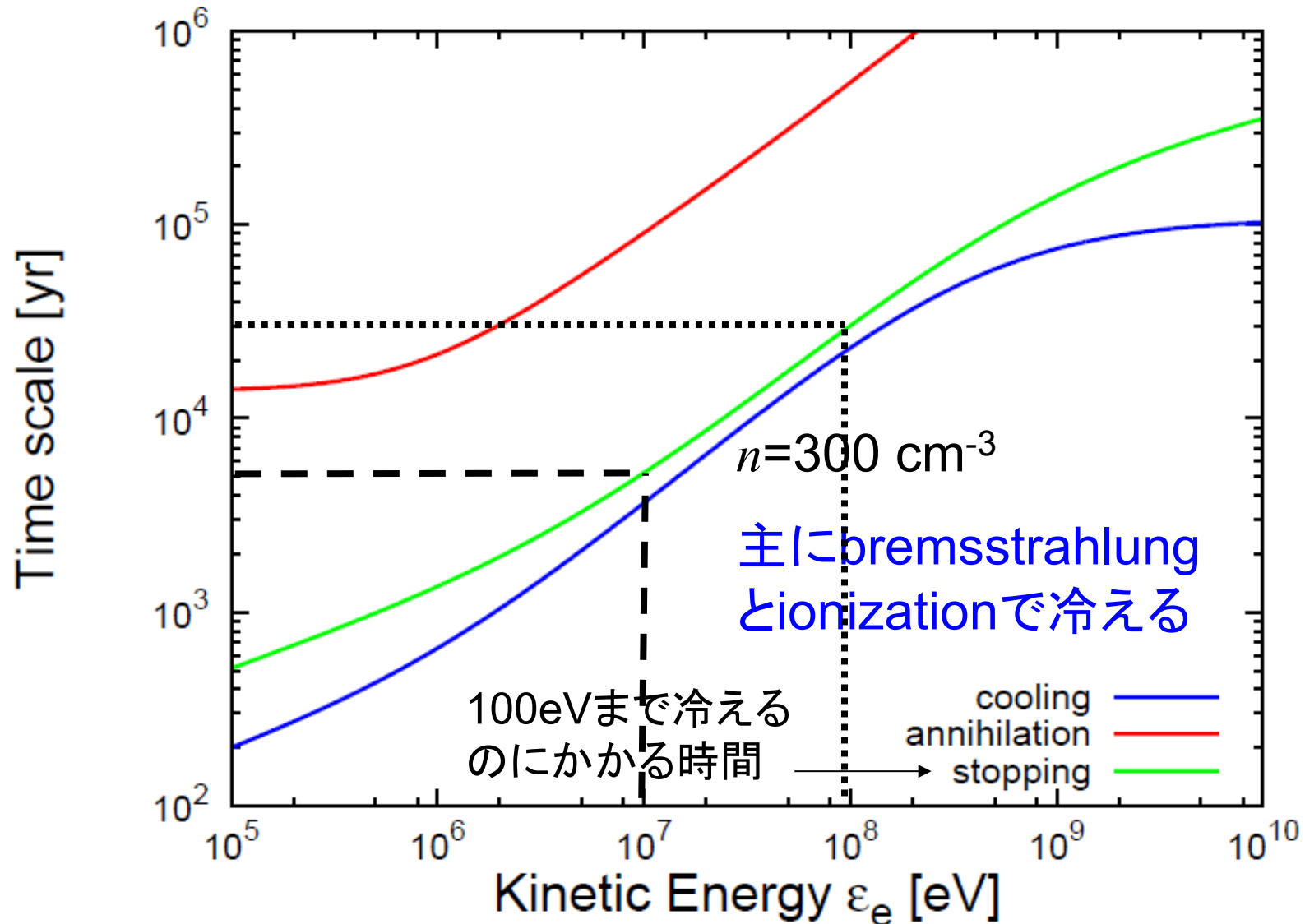
$$n=300 \text{ cm}^{-3}$$

$$R=10 \text{ pc}$$

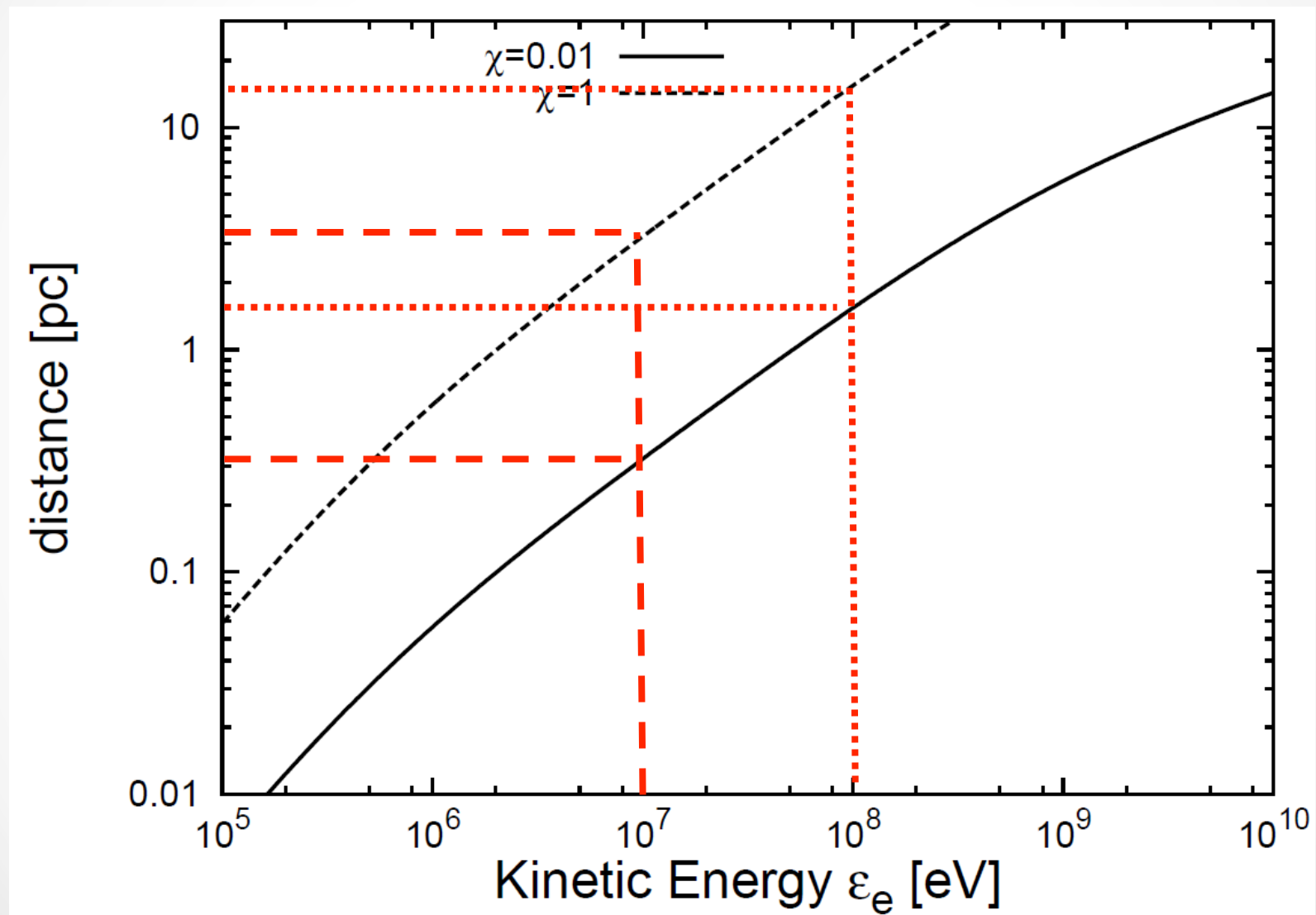
$$d=1 \text{ kpc}$$



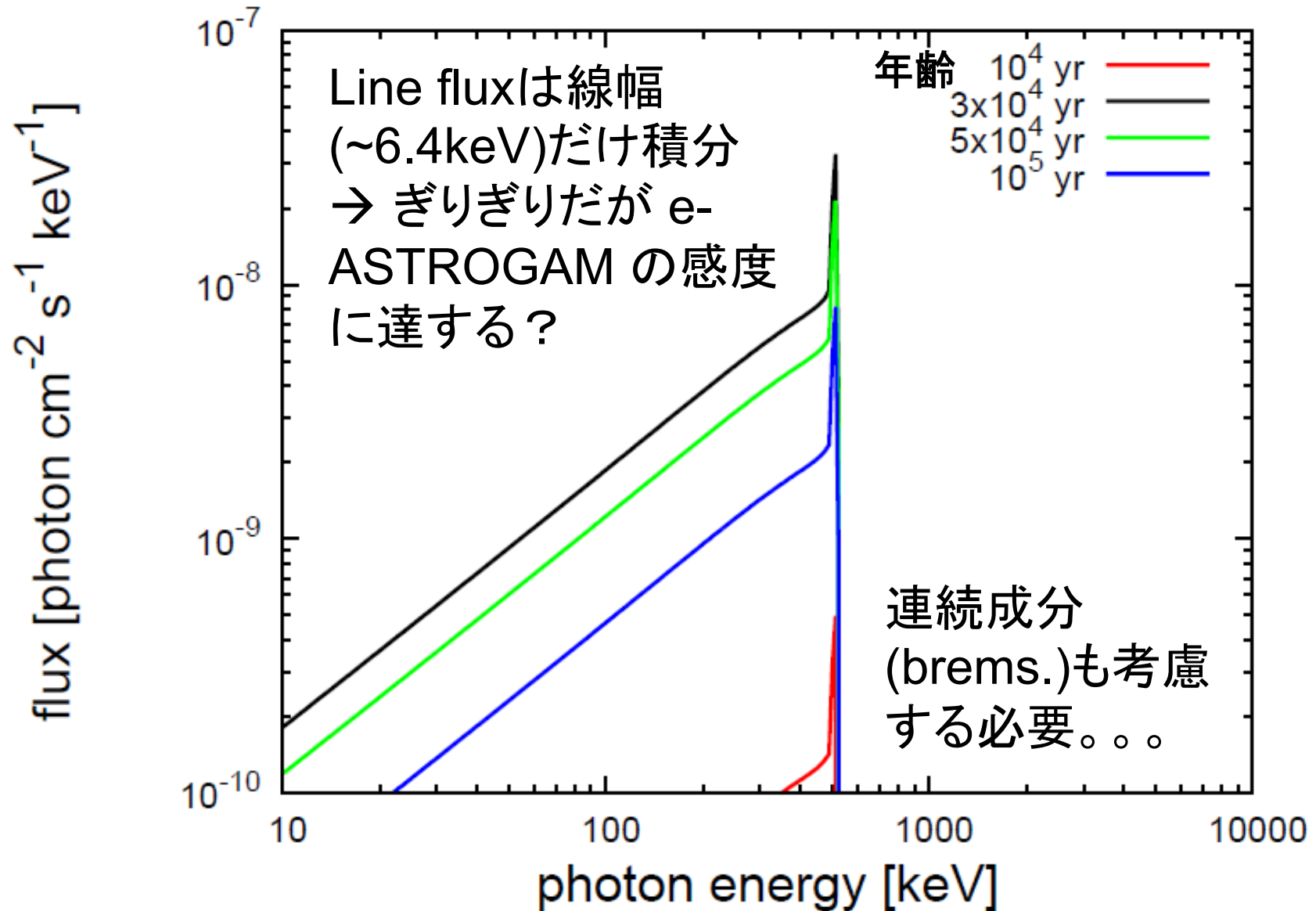
典型的な時間スケール



冷え切るまで伝播する距離



結果 (preliminary)



懸念材料

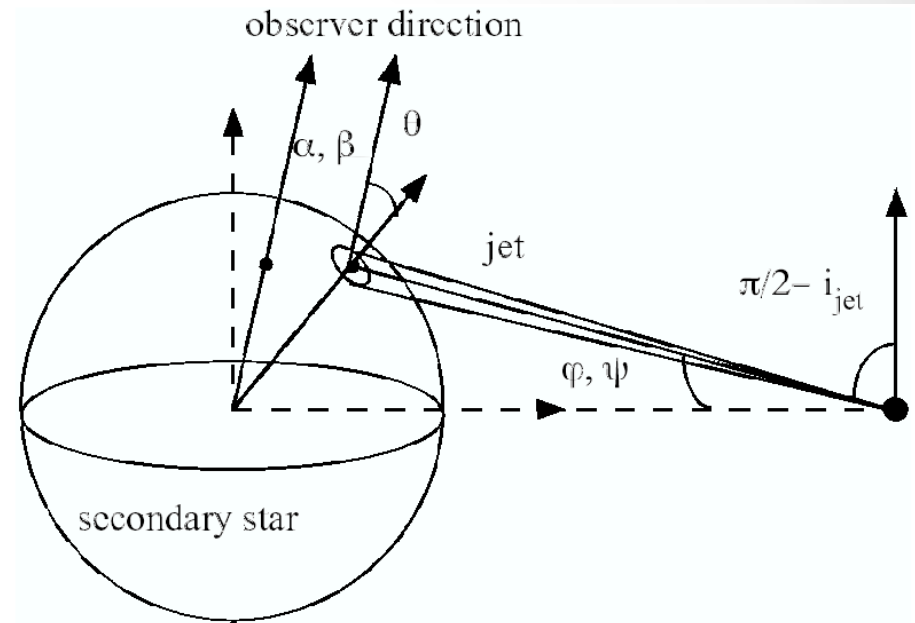
- 分子雲と associate しているパルサーがどれくらい自然に存在するのか分からない（少なくとも自分は知らない）
- 放出する電子・陽電子の最低エネルギーに大きく依存する（ $\sim 100\text{MeV}$ より大きいと line はほとんど見えない可能性）。拡散係数・分子雲の密度にもよるだろう。
- 分子雲中の超新星爆発で誕生したパルサーはキックを受ける $\rightarrow$ 分子雲から離れてしまう？（ $v \sim 300\text{km/s}$ とすると $\sim 3 \times 10^4 \text{ yr}$ で $\sim 10\text{pc}$ ）

XRBsから見えるか？

ジェットが伴星大気をhitする際に
annihilateできるかもしれない
(Guessoum et al. 2006)

ジェットのバルク速度 (0.1-0.9c)
で陽電子も飛んでいると仮定

H atomと電荷交換できるまで減速
(~60eV)するのに通過すべき
column density ~ 0.1g cm⁻²
<511keV光子のmfp (~6.6g cm⁻²)



$$F_{511 \text{ keV}}(t) = 2 \times \left(1 - \frac{3}{4} f_{\text{Ps}}\right) \times \dot{N}_{e^+} \times \frac{I(t)}{4\pi d^2}$$

where
$$I(t) = \frac{1}{\Delta\Omega_{\text{jet}}} \int_{(\varphi, \psi) \in D(t)} e^{-\frac{\lambda_E(\varphi, \psi)}{\lambda_{511 \text{ keV}} \cos \theta(\varphi, \psi)}} d\Omega(\varphi, \psi)$$

条件 : misaligned jet

軌道運動によりフラックス
は周期変動するだろう

Table 2. Predicted maximum 511 keV emission fluxes for confirmed or potentially misaligned nearby microquasars. Fluxes were calculated for “Average Jet”, that is using a positron rate of $10^{41} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$.

Source	Jet	Distance (kpc)	Flux for “Average Jet” ($10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)
GRO J1655-40	Misaligned	3.2	0.49
V4641 Sgr	Misaligned	9.6	0.05
XTE J1550-564	Misaligned?	5.3	0.18
XTE J1118+480		1.8	1.53
LS I +61° 303		2	1.24
Cyg X-1		2.5	0.79
Sco X-1		2.8	0.63
LS 5039		2.9	0.59
SS 433		4.8	0.22
GRS 1758-258		8.5	0.07
Cyg X-3		9	0.06
Cir X-1 ₂		10	0.05
GRS 1915+105 ₂		12.5	0.03
GX 339-4		≥ 8	≤ 0.08
XTE J1748-288		≥ 8	≤ 0.08
1E 1740.7-2942		8.5	0.07
IGR J17091-3624		8.5?	0.07
IGR J17303-0601		8.5?	0.07
IGR J17464-3213		8.5?	0.07
IGR J18406-0539		8.5?	0.07

意外にいけるかもしれない

欠点はmisaligned jetでなければダメということ？

- ジェットからのガンマ線放射と伴星からの放射による対生成

- 分子雲と相互作用しているジェットでのポジトロニウム生成

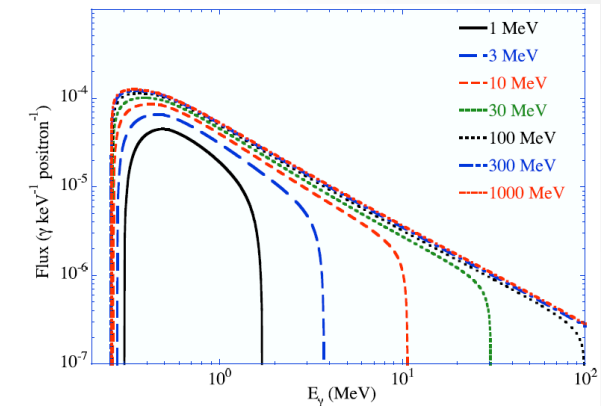
などは考えてみても面白いかも。

連続成分の評価

ラインが検出できるかどうかは連続成分との兼ね合いで決まる

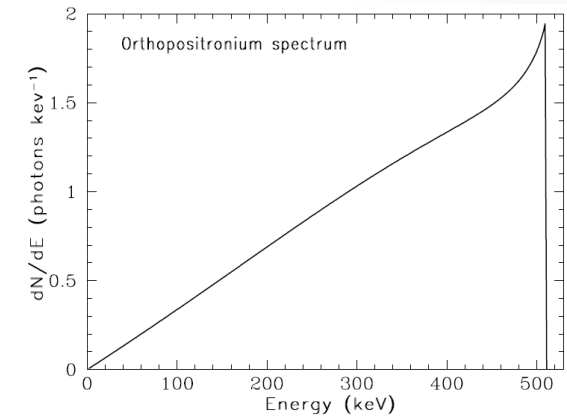
- annihilation in flight

MeV連続放射が受からなければ制限に。



- ortho-Positronium

同上



- proton bremsstrahlung

非熱的陽子が熱的電子の雲の中を突っ切るときに出る。

- 1GeVの陽子から~500keVにピークを持つスペクトル

Summary

- 511keV line の検出は（冷えた）陽電子の存在を示す最も強力な証拠となる。
- （条件さえ整えば）SNR, パルサーなど宇宙線陽電子の起源となりうる天体近傍から511keV line が出る可能性はある
- e-ASTROGAM 他で見えるか？ぎりぎり？
- MeV 連続放射は必ず出る（“annihilation in flight”, ortho-Ps, proton bremsstrahlung）。観測可能性を議論する上で評価が必要。