

# Astrophysical signatures from Galactic positronium, true muonium and true tauonium

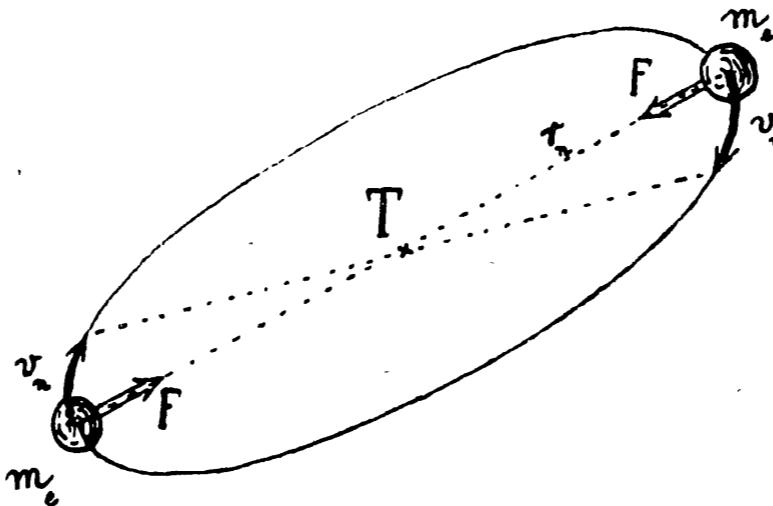
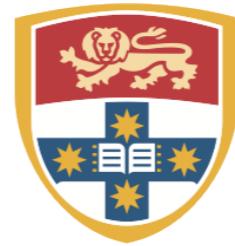


Fig. 1.

Simon Ellis  
Joss Bland-Hawthorn



Australian Government  
Department of Industry,  
Innovation and Science



THE UNIVERSITY OF  
SYDNEY

# Positronium: 1934

## ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.

Band 253.

Nr. 6052.

4.

### Möglichkeit neuer Elemente und ihre Bedeutung für die Astrophysik.<sup>1)</sup>

Von St. Mohorovičić.

Die Experimentalphysik hat neuerdings einen großen Fortschritt erzielt, indem sie die elektrischen Atome mit positiver Ladung entdeckt hat. Diese neuen Elementarteilchen haben in der Literatur den Namen »Positron« erhalten. Es ist nicht uninteressant zu erwähnen, daß bereits der unlängst dahingeschiedene amerikanische Physiker und Philosoph *Arvid Reuterdahl* in seiner Atomtheorie<sup>2)</sup> die freien elektrischen Atome mit positiver Ladung vorausgesetzt, in seine Rechnungen eingeführt und ihnen den Namen »Positon« erteilt hatte. Die experimentellen Untersuchungen haben also seine prophetischen Vermutungen glänzend bewiesen, besonders, da *Reuterdahl* voraussetzte, daß das Proton eigentlich ein zusammengesetztes Gebilde sei, nämlich Radion + Positon. Das Radion wäre der Träger der schweren Masse, und um ihn herum kreist in unmittelbarer Nähe ein Positon. Es war aber in seiner Theorie nur unverständlich, warum um Radion herum nicht auch ein Elektron kreisen konnte, d.h. warum wären die negativen Protonen nicht möglich. Es ist sehr merkwürdig, daß eine solche Möglichkeit neuerdings von *P. A. M. Dirac* zugelassen wird<sup>3)</sup>, und er schließt seinen Nobelpreis mit den Worten: »Es ist dann durchaus möglich, daß auf einigen der Sterne gerade der entgegengesetzte Zustand herrscht, daß diese Sterne also im wesentlichen aus Positronen und negativen Protonen aufgebaut sind. In der Tat könnte gerade die Hälfte aller Sterne zur einen und die Hälfte zur anderen Art gehören. Beide Arten von Sternen würden genau dieselben Spektren zeigen, und es gäbe keine Möglichkeit sie mit den gegenwärtigen astro-

anziehen. Dagegen wird die zentripetale Kraft

$$F' = -m_e \cdot v^2/r_n \quad (2)$$

und wegen der Gleichheit der beiden Kräfte ( $F=F'$ ) wird

$$v^2 = \frac{1}{4} \cdot e/r_n \cdot e/m_e. \quad (3)$$

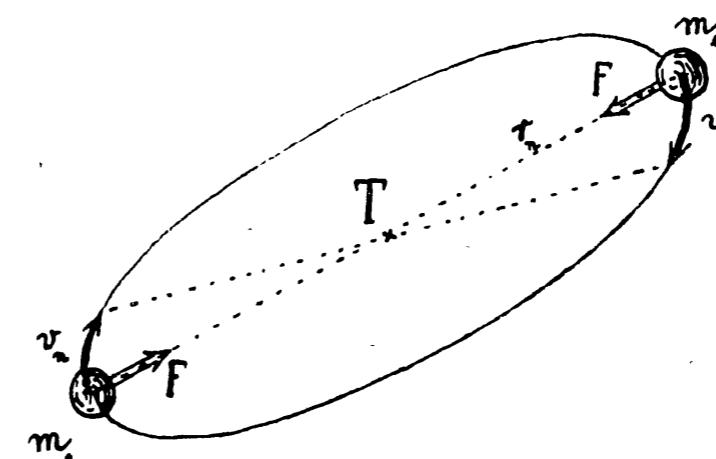


Fig. 1.

Da hier  $v < \dots < c$ , so ist  $m_e \perp m_e^0$ , und ich habe schon früher gefunden<sup>4)</sup>, daß

$$\frac{e}{m_e^0} = \frac{\rho c^2}{j \mu} = 5.224 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{3/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ sec}^{-1} \quad (4)$$

wo  $\rho$  eine Konstante ist, d. h.

$$\rho = 1.068 \stackrel{35}{\pm} \sqrt{10}$$

$$j = 1 \left[ \frac{\text{El.-st. Einh.}}{\text{cm}} \right] = 1 \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1} \quad (5)$$

# Positronium: I95I

## Evidence for the Formation of Positronium in Gases\*

MARTIN DEUTSCH

*Laboratory for Nuclear Science and Engineering, and Department of Physics,  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*

(Received March 13, 1951)

THE distribution of time delays between the emission of a nuclear gamma-ray from the decay of  $\text{Na}^{22}$  and the appearance of an annihilation quantum has been measured for positrons stopping in a large number of gases and gas mixtures, extending earlier measurements.<sup>1</sup> A complete interpretation of the results appears to be fairly complex and will be attempted in a more extensive communication. At this time we want to report on some definite proof of the abundant formation of positronium, the bound electron-positron system analogous to the hydrogen atom. The

# Positronium: 1978

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 225: L11-L14, 1978 October 1  
© 1978. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## DETECTION OF 511 keV POSITRON ANNIHILATION RADIATION FROM THE GALACTIC CENTER DIRECTION\*

M. LEVENTHAL

Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey

AND

C. J. MACCALLUM† AND P. D. STANG†

Sandia Laboratories, Albuquerque

*Received 1978 June 7; accepted 1978 July 6*

### ABSTRACT

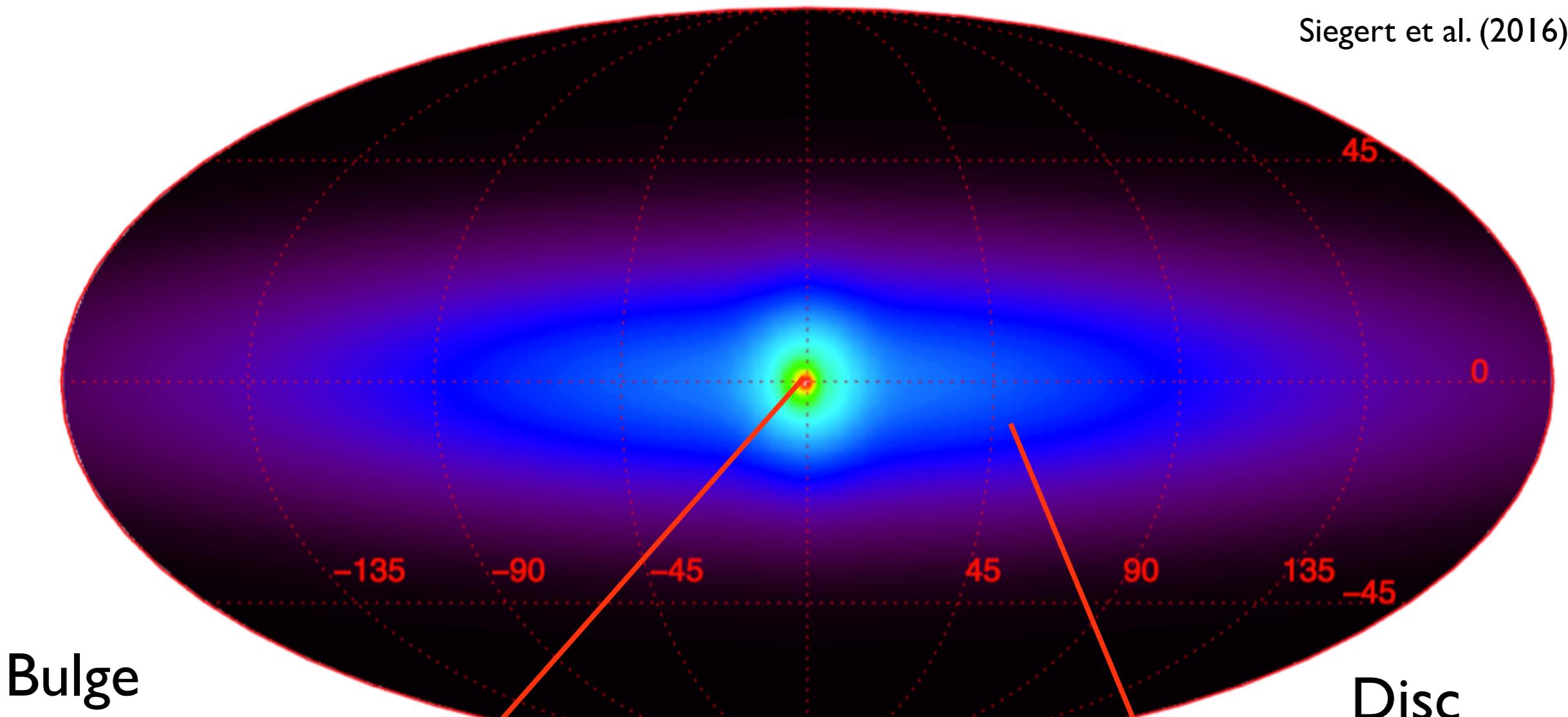
A balloon-borne germanium  $\gamma$ -ray telescope was flown over Alice Springs, Australia, in an attempt to detect spectral features from the galactic center (GC) direction. A 511 keV positron annihilation line was detected at a flux level of  $(1.22 \pm 0.22) \times 10^{-3}$  photons  $s^{-1} cm^{-2}$ . Suggestive evidence for the detection of the three-photon positronium (ps) continuum is presented. A brief discussion of the possible origin of the positrons is given.

*Subject headings:* galaxies: Milky Way — gamma rays: general

# Model of the 511 keV emission from the Galaxy

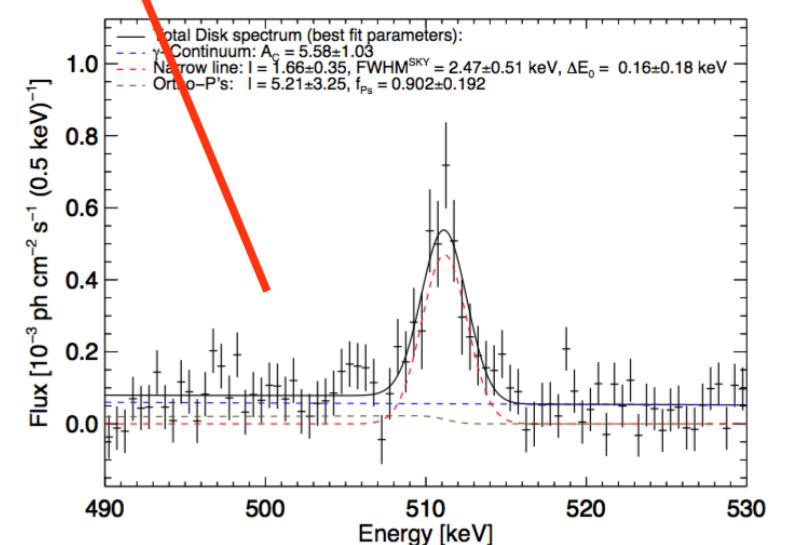
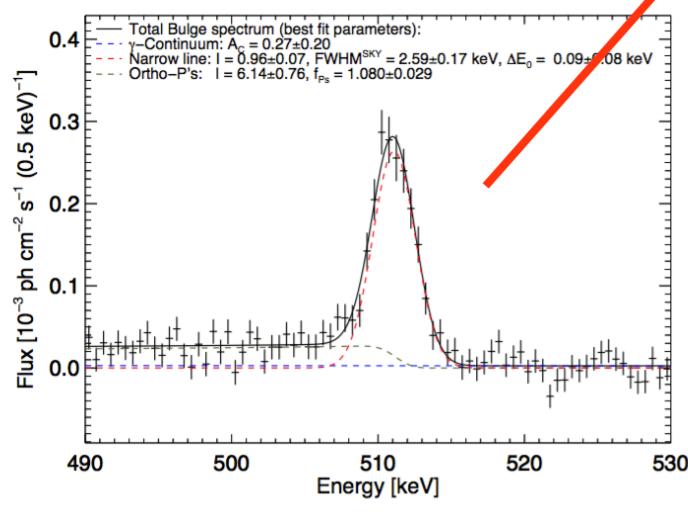
N.B. the cube root of the flux is shown to highlight the faint disc emission

Siegert et al. (2016)



Bulge

Disc



# States of positronium

Para-Ps  
spins anti-parallel

$e^- \uparrow e^+ \downarrow$

total spin,  $S=0$   
total angular momentum,  
 $J=L+S$   
 $J=0$   
**Singlet**

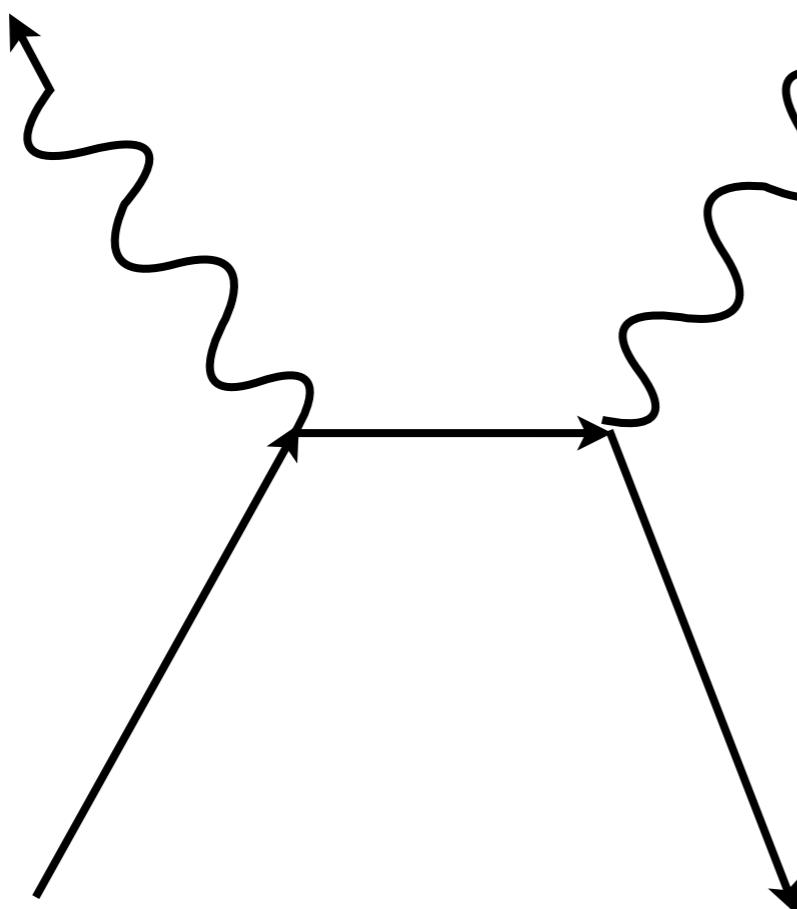
Ortho-Ps  
spins parallel

$e^- \uparrow e^+ \uparrow$

total spin,  $S=1$   
total angular momentum,  
 $J=L+S$   
 $J=-1, 0, 1$   
**Triplet**

# Annihilation of positronium

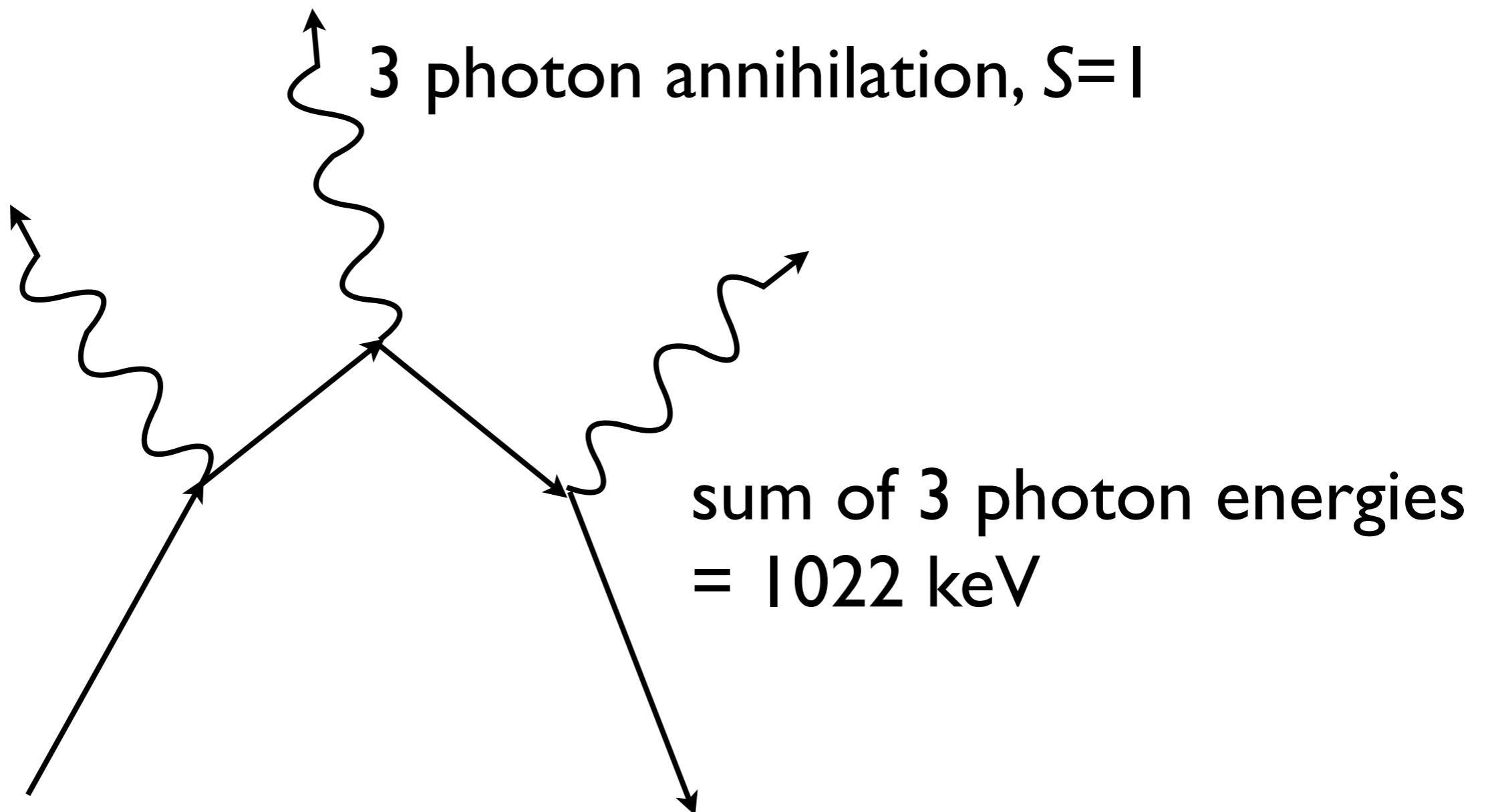
2 photon annihilation,  $S=0$



$$\begin{aligned} E &= 2m_e c^2 \\ &= 1022 \text{ keV} \end{aligned}$$

i.e. each photon = 511 keV

# Annihilation of positronium



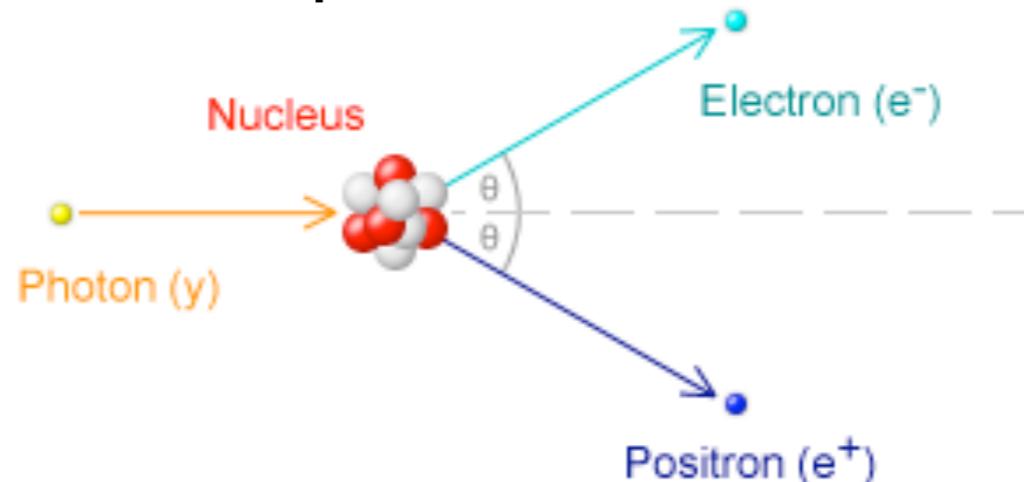
# Galactic positron production

$\beta^+$  decay:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

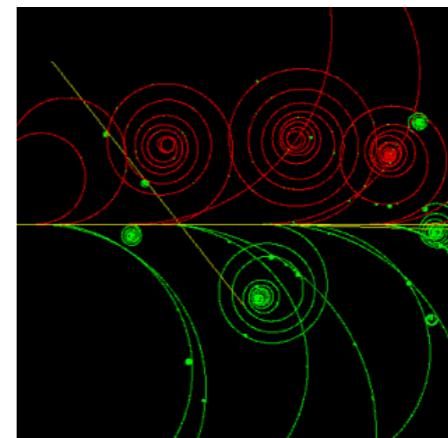
$\pi^+$  decay:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

Pair production:



Pair production in a magnetic field:

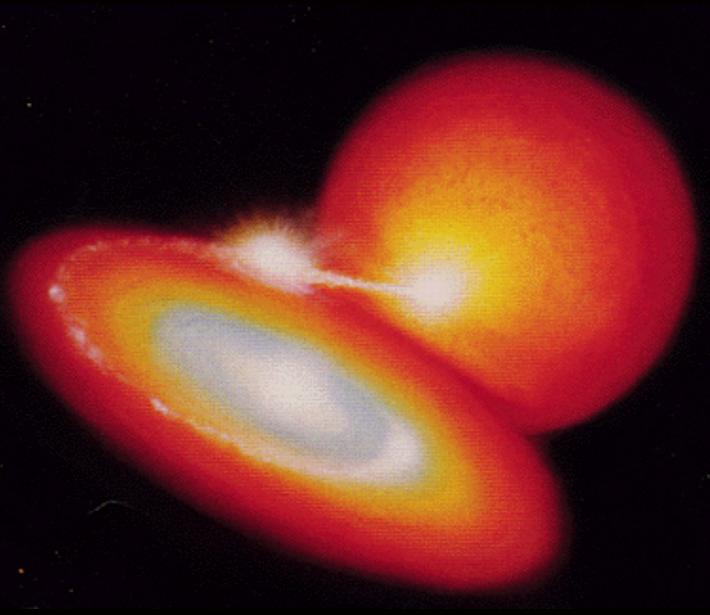


Guessoum et al. 2005

# Galactic positron sources

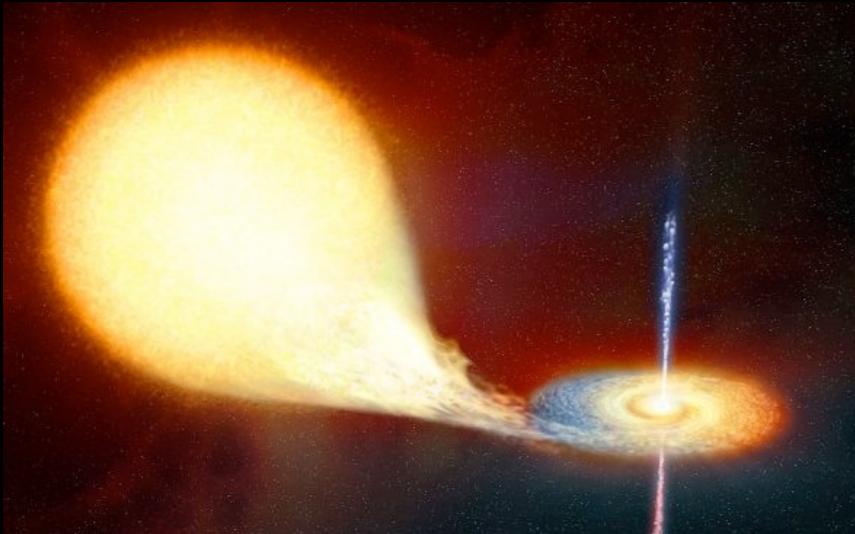


supernovae

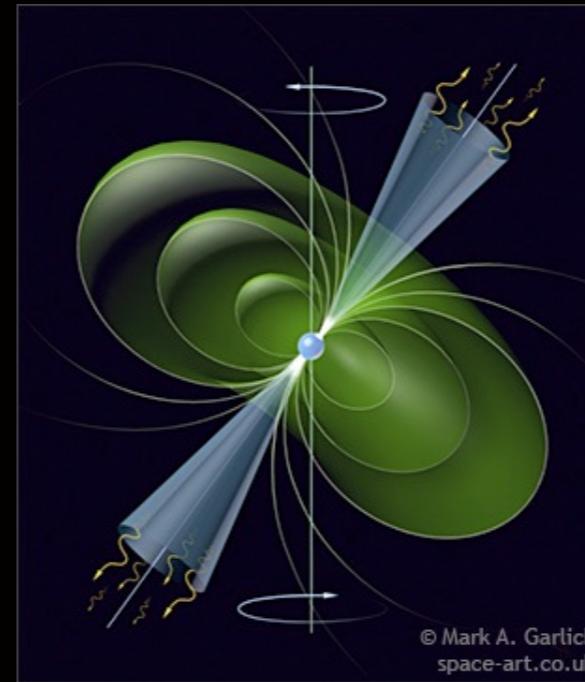


novae

dark matter



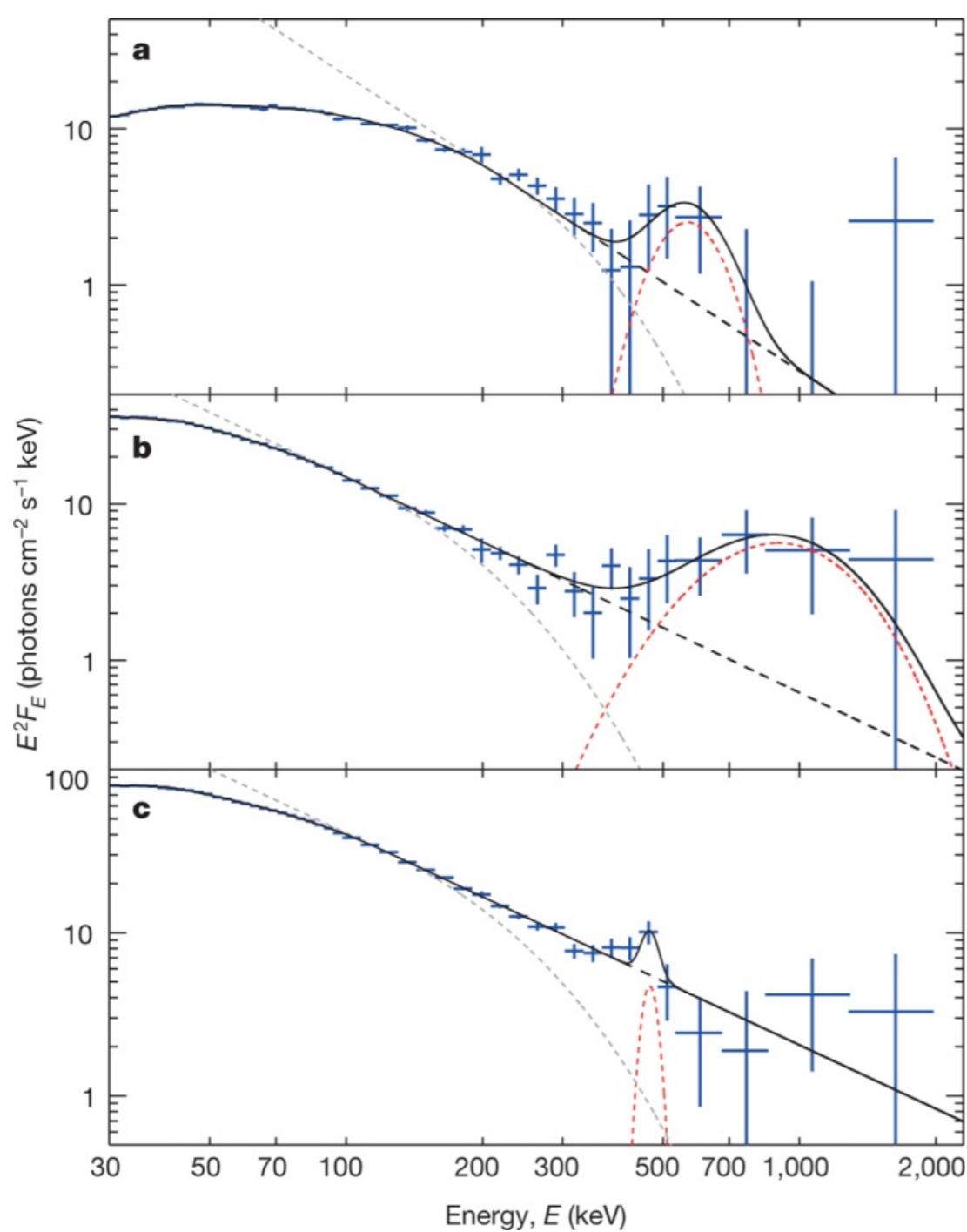
microquasars and  
low mass X-ray binaries



pulsars

© Mark A. Garlick  
space-art.co.uk

# Positronium point source



Recently, 511 keV emission was observed during a flare of the microquasar V404 Cygni - the first detection of a point source of positrons.

# States of positronium

Singlet  
Para-Ps  
spins anti-parallel

$e^- \uparrow e^+ \downarrow$

2 photon annihilation  
( $2 \times 511\text{keV}$ )

$1.26 \times 10^{-10}\text{s}$

Triplet  
Ortho-Ps  
spins parallel

$e^- \uparrow e^+ \uparrow$

3 photon annihilation  
( $\gamma$ -ray continuum)

$1.4 \times 10^{-7}\text{s}$

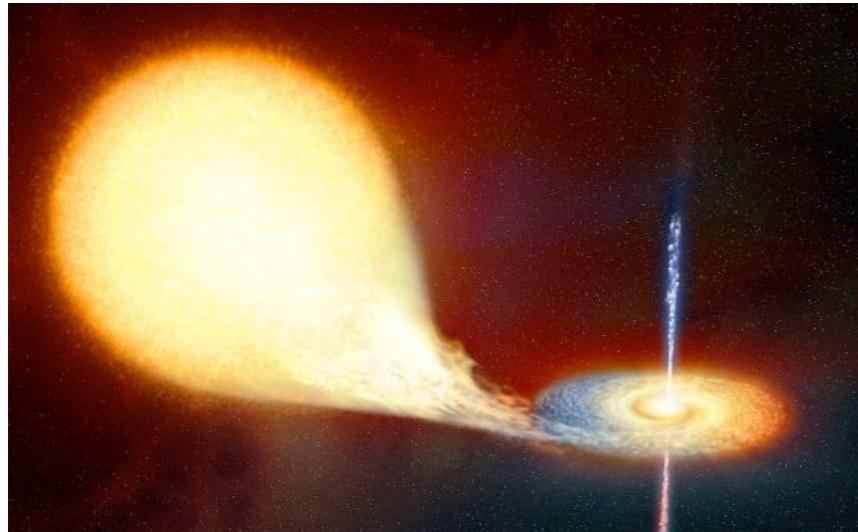
# Lifetime of positronium

$$T \propto n^3$$

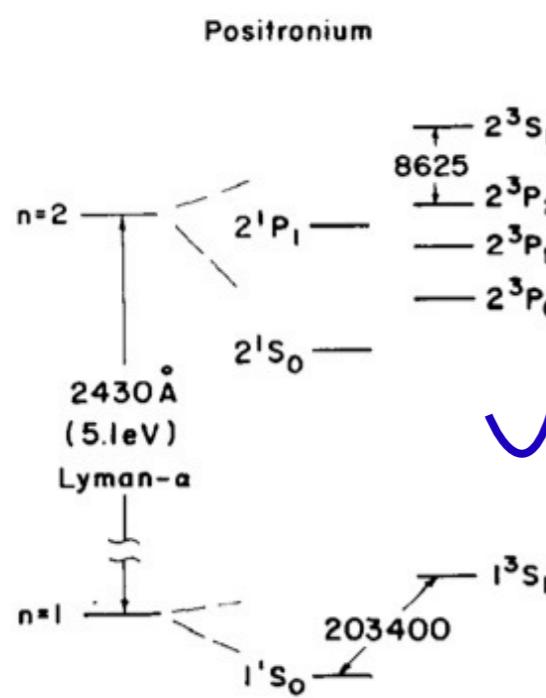
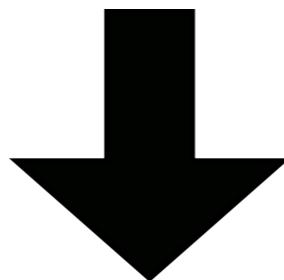
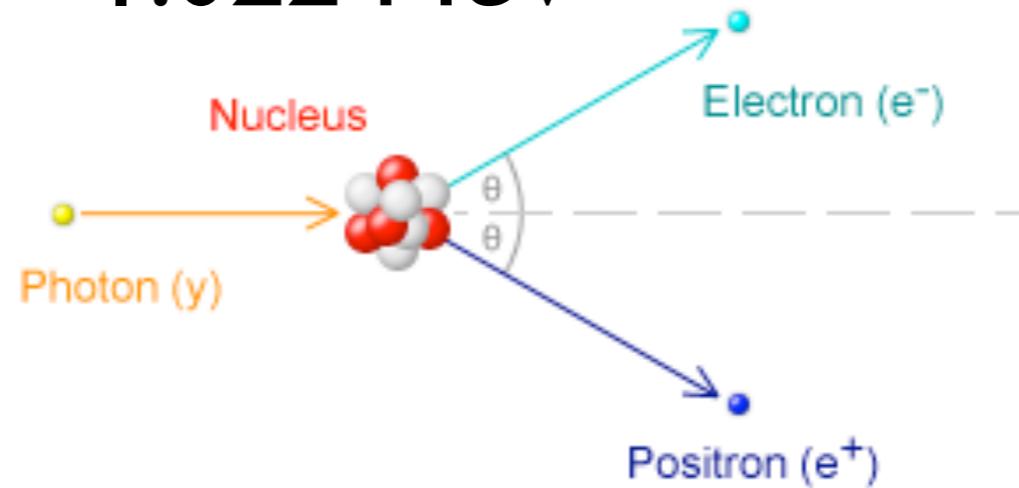
Table 1: The radiative and annihilation lifetimes of Ps for various energy levels.

$n$	Singlet Ps		Triplet Ps		
	Radiative lifetime $\tau/s$	Annihilation lifetime $T/s$	Ratio $T/\tau$	Annihilation lifetime $T/s$	Ratio $T/\tau$
1	—	$1.25 \times 10^{-10}$	—	$1.41 \times 10^{-7}$	—
2	$4.26 \times 10^{-9}$	$10.0 \times 10^{-10}$	0.23	$1.1 \times 10^{-6}$	265
3	$8.12 \times 10^{-8}$	$3.37 \times 10^{-9}$	0.041	$3.8 \times 10^{-6}$	46.9
4	$6.17 \times 10^{-7}$	$8.00 \times 10^{-9}$	0.013	$9.0 \times 10^{-6}$	14.6
5	$2.90 \times 10^{-6}$	$1.56 \times 10^{-8}$	0.0053	$1.76 \times 10^{-5}$	6.03
6	$1.04 \times 10^{-5}$	$2.70 \times 10^{-8}$	0.0026	$3.05 \times 10^{-5}$	2.93

# Detecting Ps recombination lines



>1.022 MeV



<6.8eV

# Energy levels of positronium

Solving the Schroedinger equation for Ps gives:

$$E_n = \frac{\mu e^4}{2\hbar^2(4\pi \epsilon_0)^2 n^2}$$

where

$$\mu = \frac{m_e m_e}{m_e + m_e} = \frac{m_e}{2}$$

∴ energy levels are half those of hydrogen

so wird

$$2m_e r_n^2 \omega = n \hbar / 2\pi \quad (n=1, 2, 3, \dots) . \quad (10)$$

Aus der Relation für die Zentripetalkraft

$$|F| = m_e v^2 / r_n = m_e v \omega = m_e r_n \omega^2 \quad (11)$$

und durch Vergleich mit obigem, folgt

$$e^2 / 4r_n^2 = m_e r_n \omega^2 \quad \text{oder} \quad 4m_e r_n^3 \omega^2 = e^2 \quad (12)$$

und durch Division mit (10):

$$v = r_n \omega = \pi e^2 / n \hbar \quad (13)$$

durch Vergleich mit (3) erhält man endlich:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{4\pi^2 m_e e^2} \quad (n=1, 2, 3, \dots) . \quad (14)$$

Setzen wir  $\hbar = 6.547 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^2 \text{ g sec}^{-1}$  und  $m_e \cdot m_e^0 = 9.143 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ , so wird für  $n=1$ , d. h. für die erste mögliche Bahn, der Halbmesser

$$r_1 = 0.5212 \cdot 10^{-8} \text{ cm} . \quad (15)$$

Wir sehen also, daß die Dimensionen der Electrumatome von derselben Größenordnung wie diejenigen der Wasserstoffatome sind. Die lineare Geschwindigkeit des Elektrons und Positrons auf der ersten möglichen Bahn ist:

$$v_1 = \pi e^2 / \hbar \quad (16)$$

und die Feinstrukturkonstante der Spektrallinien

$$\alpha = v_1 / c = \pi e^2 / c \hbar . \quad (17)$$

Da ich früher gefunden habe<sup>1)</sup>, daß

$$e^2 / c \hbar = 2\rho / \mu \quad (18)$$

ist, so wird

$$\alpha = 2\pi\rho / \mu = 3.646 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

d. h., sie ist zweimal kleiner als die Feinstrukturkonstante des Wasserstoffatoms. Aus (17) und (19) folgt sofort:

$$v_1 = 1.0939 \cdot 10^8 \text{ cm sec}^{-1} . \quad (20)$$

wo die neue Konstante

$$M_\infty = \frac{\pi^2 m_e e^4}{\hbar^3 c} = \frac{1}{2} R_\infty = 54868.56 \pm 0.06 \quad (26)$$

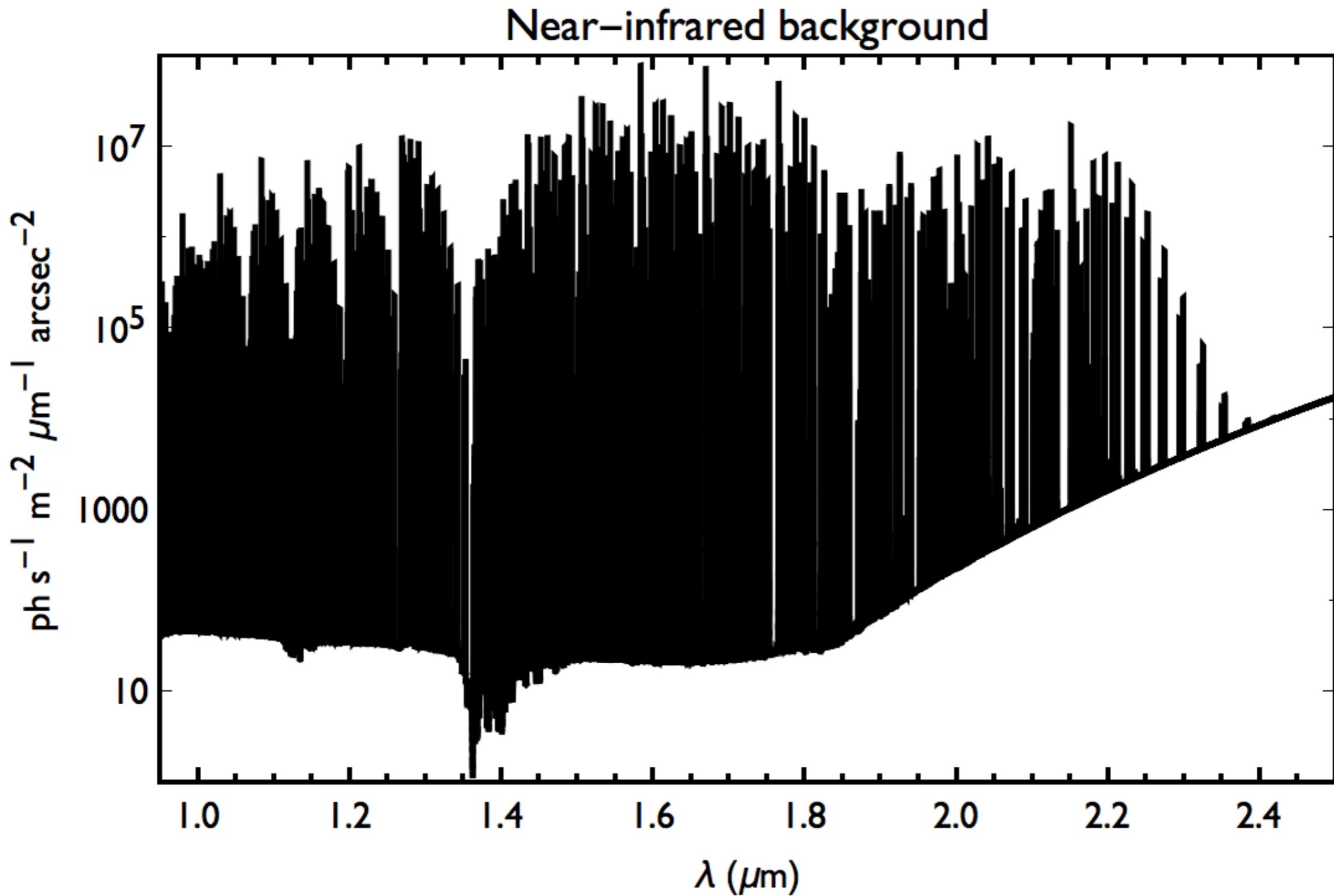
zweimal kleiner als die bekannte Rydbergsche Spektralkonstante ist. Wir sehen also, daß das Spektrum von diesem »abarischen« Element Electrum ganz ähnlich dem Spektrum des Wasserstoffs sein wird, nur wird die Wellenlänge jeder seiner Linien zweimal so groß sein wie die Wellenlänge der entsprechenden Wasserstofflinie. Werden die Wellenlängen in Ångström-Einheiten ausgedrückt, so ergibt sich aus (25) und (26) die folgende Tabelle:

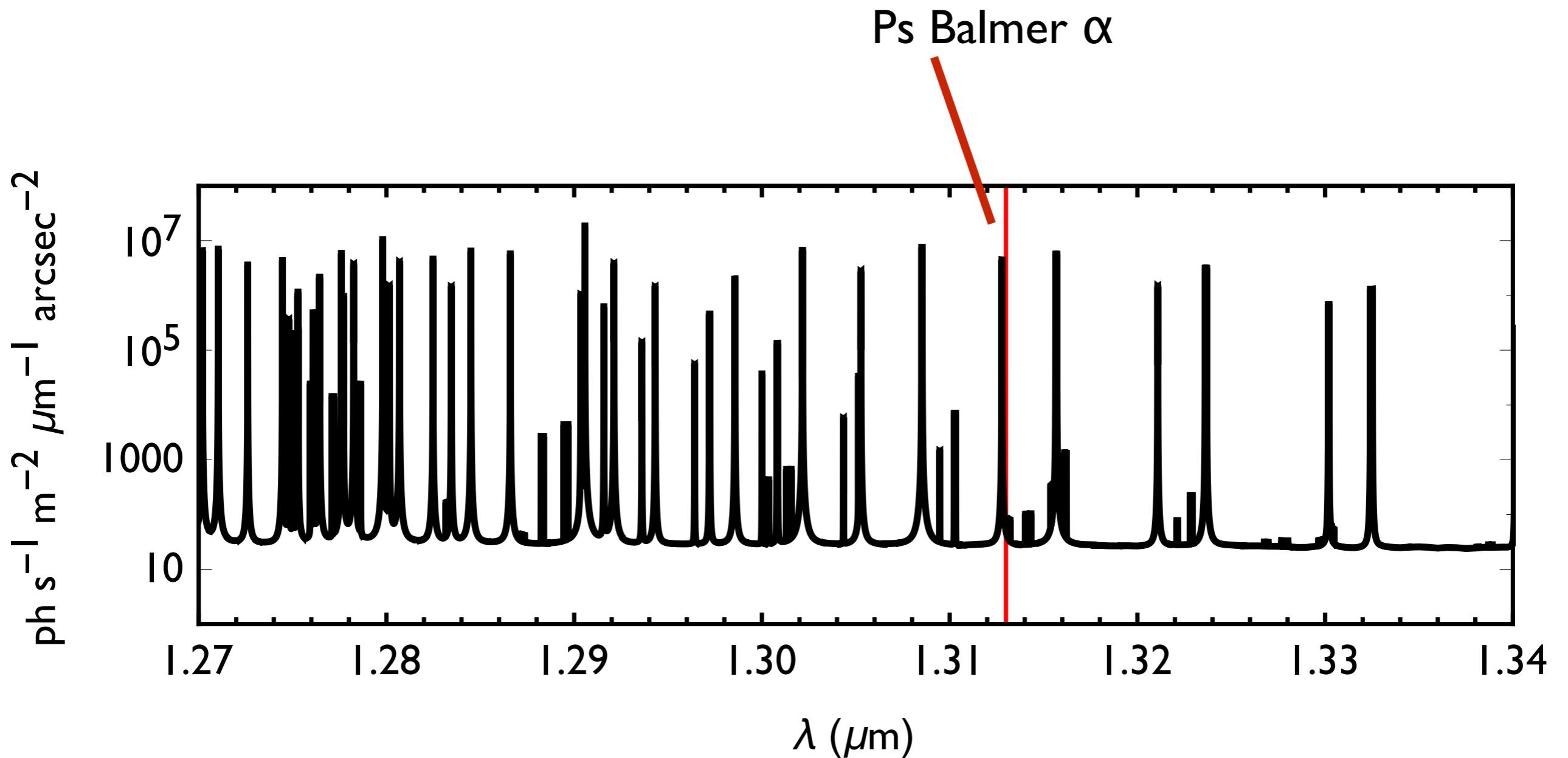
$n=1:$				
$k=1$	2	3	4	5
$\lambda = -$	2430.55	2050.36	1944.04	1898.48
$k =$	6	.....	$\infty$	
$\lambda =$	1874.61	.....	1822.54	
$n=2:$				
$k=2$	3	4	5	6
$\lambda = -$	13122.30	9720.22	8678.76	8201.44
$k =$	7	.....	$\infty$	
$\lambda =$	7938.17	.....	7290.15	
$n=3:$				
$k=3$	4	5	6	7
$\lambda = -$	37492.26	25629.47	21870.45	20093.51
$k =$	8	.....	$\infty$	
$\lambda =$	19086.92	.....	16402.87	

Die Serie  $n=1$  liegt ganz im ultravioletten Teile des Spektrums, dagegen befindet sich die Serie  $n=3$  ganz im infraroten Teile. Die Serie  $n=2$  fällt größtenteils in den sichtbaren Teil des Spektrums (rot und orange) und wäre am leichtesten experimentell kontrollierbar.

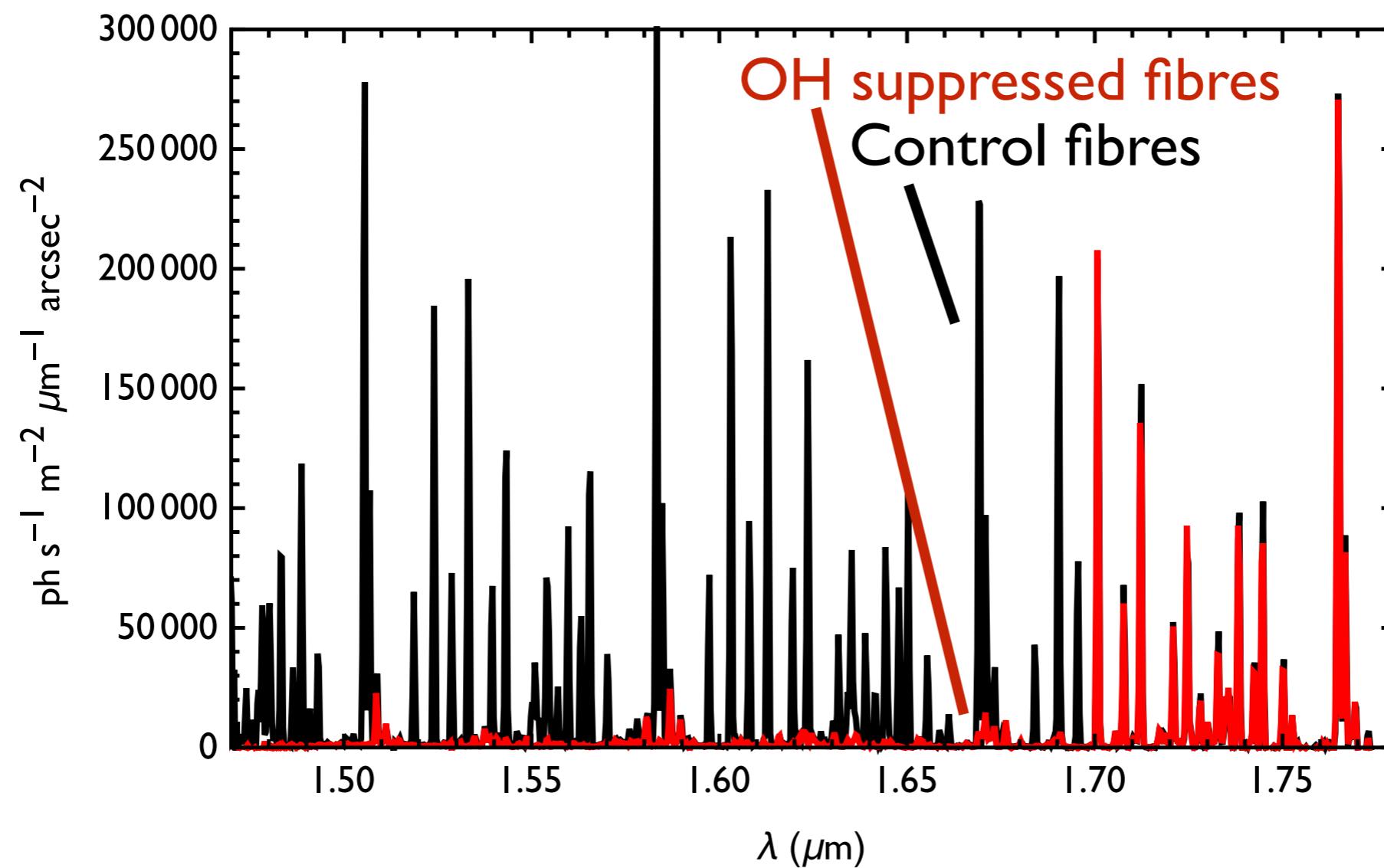
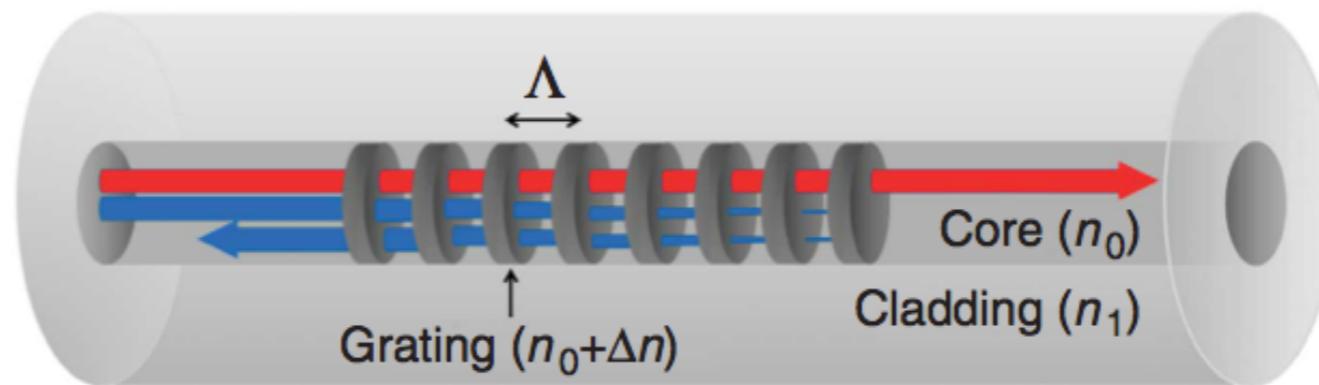
Dieses neue und möglichst leichte Element »Electrum« hat das Atomgewicht  $\sim 0.0001865 \sim 0.186 \cdot 10^{-3}$  (falls wir

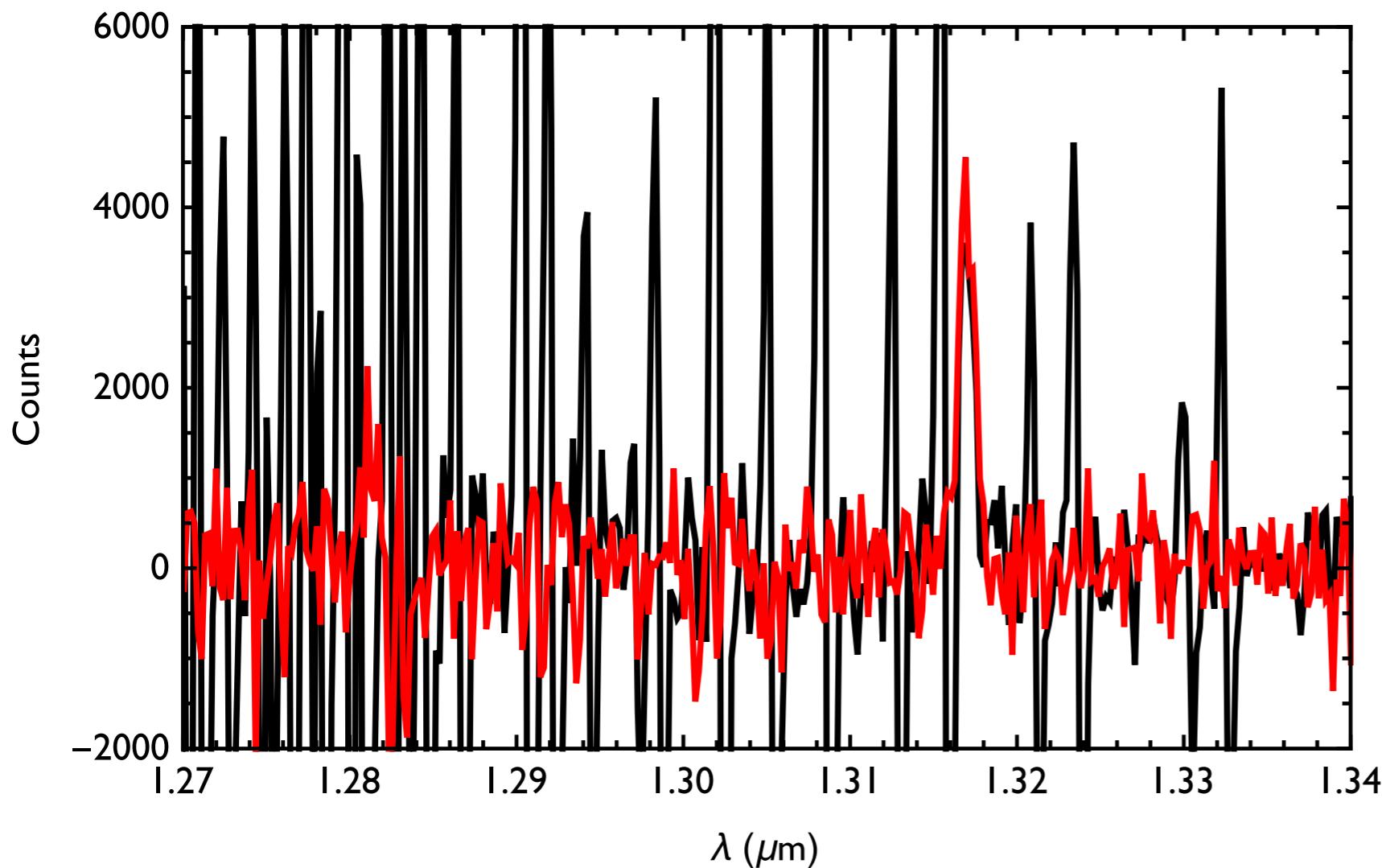
# The near-infrared night sky





# OH suppression





Simulation of 6hr  
observation of a Seyfert I  
AGN.

Control spectrum  
OH suppressed  
spectrum

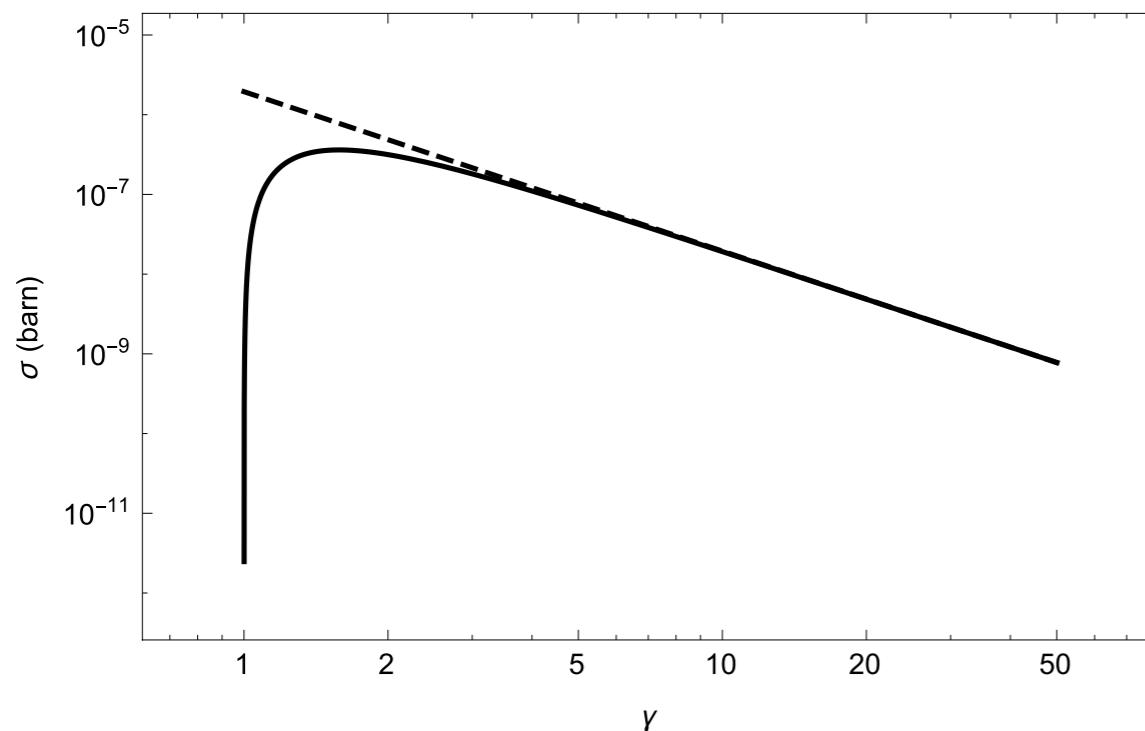
# True muonium and true tauonium

$\mu^- \mu^+$  and  $\tau^- \tau^+$

Both  $\mu$  and  $\tau$  unstable.  $T_\mu = 2.197 \times 10^{-6}$  s and  $T_\tau = 2.874 \times 10^{-13}$  s

Can only form leptonium from very low energy pairs.  
Energy must be greater than pair production threshold,  
less than ionisation energy

$$\gamma_{\text{lim}} = 1 + \frac{q^4}{128\pi^2 c^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = 1 + 6.656 \times 10^{-6}.$$

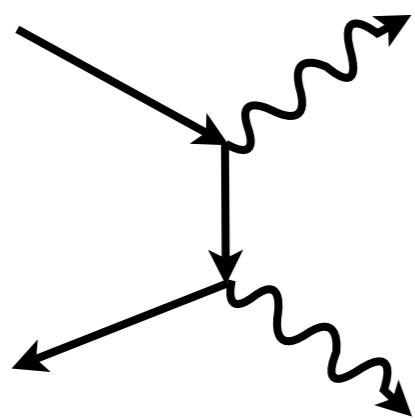


$e^- e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$        $f = 10^{-7} - 10^{-6}$   
 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^- \mu^+$

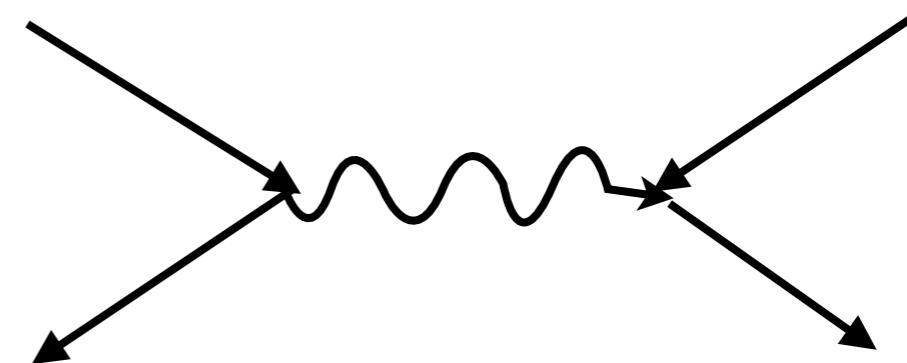
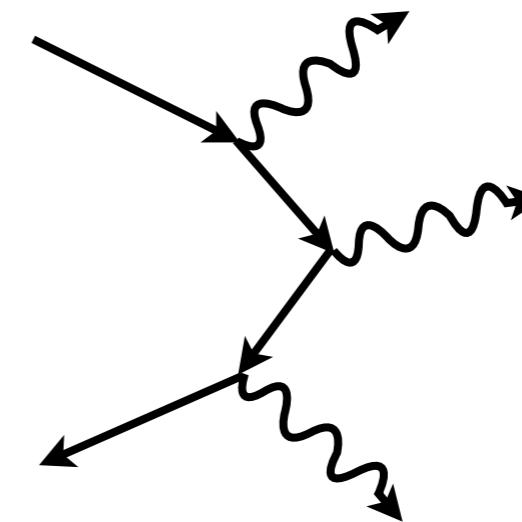
Ellis and Bland-Hawthorn, 2015, PRD

# Leptonium decay channels

Singlet



Triplet



Both  $\mu$  and  $\tau$  unstable.  $T_\mu = 2.197 \times 10^{-6}$  s and  $T_\tau = 2.874 \times 10^{-13}$  s

# Leptonium decay channels - branching ratios

TABLE V: Total branching ratios for Ps as a function of temperature.

T (K)	Ly $\alpha$	Ly $\beta$	Balmer $\alpha$	Balmer $\beta$	Two photon decay	Three photon decay	
1000	0.46	0.08	0.24		0.06	0.24	0.73
10000	0.29	0.07	0.09		0.03	0.25	0.74
100000	0.11	0.03	0.03		0.01	0.25	0.75
1000000	0.04	0.01	0.02		0.01	0.25	0.75
10000000	0.03	0.01	0.02		0.01	0.25	0.75

TABLE VI: Total branching ratios for M as a function of temperature.

T (K)	Ly $\alpha$	Ly $\beta$	Balmer $\alpha$	Balmer $\beta$	Two photon decay	Three photon decay	Electron-positron decay	Decay of either particle	
1000	0.37	0.04	0.27		0.04	0.16	0.00	0.48	0.36
10000	0.45	0.05	0.31		0.05	0.20	0.00	0.59	0.21
100000	0.46	0.07	0.26		0.06	0.23	0.00	0.70	0.07
1000000	0.32	0.07	0.12		0.04	0.25	0.00	0.74	0.01
10000000	0.13	0.04	0.02		0.01	0.25	0.00	0.74	0.00

TABLE VII: Total branching ratios for T as a function of temperature.

T (K)	Ly $\alpha$	Ly $\beta$	Balmer $\alpha$	Balmer $\beta$	Two photon decay	Three photon decay	Electron-positron decay	Decay of either particle	
1000	0.01	0.00	0.00		0.00	0.03	0.00	0.06	0.91
10000	0.01	0.00	0.00		0.00	0.03	0.00	0.07	0.90
100000	0.01	0.00	0.00		0.00	0.04	0.00	0.09	0.87
1000000	0.01	0.00	0.00		0.00	0.06	0.00	0.12	0.83
10000000	0.02	0.00	0.00		0.00	0.08	0.00	0.17	0.75

# Leptonium observational signatures

TABLE I: Summary of the main properties of Ps, M and T.

		Ps	M	T
Rest mass/annihilation energy (MeV)		0.511	105.66	1406.6
Ionisation energy (eV)		6.8	1784.1	23751.4
Bohr radius (m)		$1.058 \times 10^{-10}$	$5.199 \times 10^{-13}$	$3.044 \times 10^{-14}$
Decay time of constituent particles (s)		$\infty$	$2.197 \times 10^{-6}$	$2.874 \times 10^{-13}$
$\gamma\gamma$ Annihilation time (ground state) (s)	Singlet	$1.2 \times 10^{-10}$	$6.0 \times 10^{-13}$	$3.6 \times 10^{-14}$
	Triplet	$1.4 \times 10^{-7}$	$6.7 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-11}$
$e^-e^+$ Annihilation time (ground state) (s)	Triplet	—	$1.8 \times 10^{-12}$	$1.1 \times 10^{-13}$
Recombination time ( $nL \rightarrow n'L'$ ) (s)	$2\ 1 \rightarrow 1\ 0$ (Lyman $\alpha$ )	$3.191 \times 10^{-9}$	$1.543 \times 10^{-11}$	$9.18 \times 10^{-13}$
	$3\ 1 \rightarrow 1\ 0$ (Lyman $\beta$ )	$1.195 \times 10^{-8}$	$5.780 \times 10^{-11}$	$3.44 \times 10^{-12}$
	$3\ 1 \rightarrow 2\ 0$	$8.905 \times 10^{-8}$	$4.307 \times 10^{-10}$	$2.56 \times 10^{-11}$
	$3\ 0 \rightarrow 2\ 1$	$3.166 \times 10^{-7}$	$1.531 \times 10^{-9}$	$9.11 \times 10^{-11}$
	$3\ 2 \rightarrow 2\ 1$	$3.092 \times 10^{-8}$	$1.495 \times 10^{-10}$	$8.89 \times 10^{-12}$
	$4\ 1 \rightarrow 2\ 0$	$2.068 \times 10^{-7}$	$9.999 \times 10^{-10}$	$5.95 \times 10^{-11}$
	$4\ 0 \rightarrow 2\ 1$	$7.753 \times 10^{-7}$	$3.750 \times 10^{-9}$	$2.23 \times 10^{-10}$
	$4\ 2 \rightarrow 2\ 1$	$9.692 \times 10^{-8}$	$4.687 \times 10^{-10}$	$2.79 \times 10^{-11}$
Recombination energies (keV)	Lyman $\alpha$	$5.102 \times 10^{-3}$	1.055	17.7
	Lyman $\beta$	$6.047 \times 10^{-3}$	1.250	21.0
	Balmer $\alpha$	$9.448 \times 10^{-4}$	0.195	3.3
	Balmer $\beta$	$1.276 \times 10^{-3}$	0.264	4.4

# Summary

- Ps is detected via its annihilation
- In triplet state, Ps, survives long enough to emit recombination lines
- Ps Balmer  $\alpha$  offers the best prospects of detection of Galactic sources
- Optical detection offers far superior spatial resolution - a new window into the high energy Universe
- With OH suppression Ps recombination lines should be detectable
- Should also be (faint) x-ray and  $\gamma$ -ray signals from true muonium and true tauonium annihilation and recombination

