

# SUNIST 等离子体电子温度与密度的 原子发射光谱诊断

博士生：谢会乔  
导 师：高 喆 教授

清华大学工程物理系

2014-06-11

# 提纲

- 1 引言
- 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法
- 3 SUNIST 氮放电等离子体  $T_e$  与  $N_e$  的发射光谱诊断
- 4 总结、课题主要创新与不足之处
- 5 致谢

# 提纲

## 1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

## 2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 提纲

## 1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

## 2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

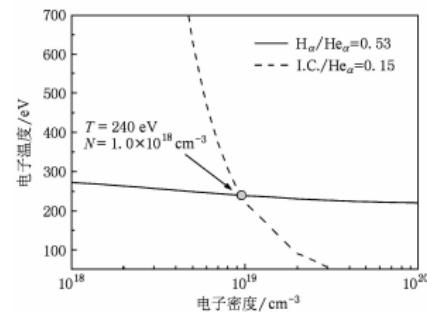
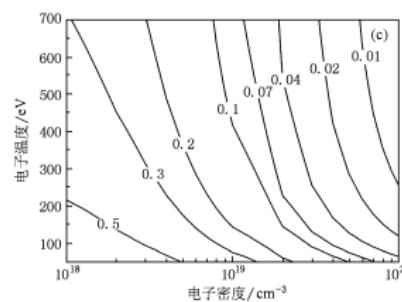
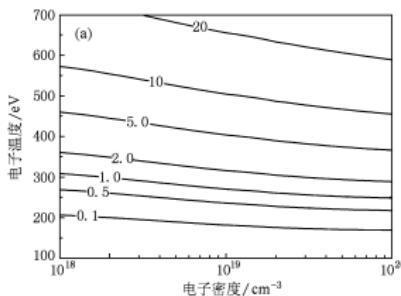
# 托卡马克等离子体的 $T_e$ 与 $N_e$ 诊断

- 托卡马克聚变研究已经取得重大进展
  - ◆ JT-60U 上获得等效 Q 值达 1.25 [Fujita T, NF(1999)]
  - ◆ JET 上获得最高 16.1 MW 瞬时功率输出 [Keilhacker M, NF(1999)]
- 由诊断技术和工具的进步所伴随
  - ◆ 越来越高的等离子体温度带来考验
- 非侵入 (noninvasive) 诊断手段受到重视
  - ◆ 辐射与粒子测量手段的兴起
  - ◆ 主动测量：射入探测粒子束或激光束
  - ◆ 被动测量：被动接收等离子体的光谱或粒子辐射

# 同时确定 $T_e$ 与 $N_e$ 的等离子体谱线辐射强度比法

- 通过对等离子体内的碰撞辐射过程进行建模，获得谱线强度比在  $T_e - N_e$  空间内的分布
- 根据谱线比实验测量结果确定电子温度与密度

$$\frac{I_{\lambda_{ji}}}{I_{\lambda_{qp}}} = \frac{\epsilon_{ji} T_{\lambda_{ji}} \eta_{\lambda_{ji}}}{\epsilon_{qp} T_{\lambda_{qp}} \eta_{\lambda_{qp}}} = \frac{1}{F_R} \frac{T_{\lambda_{ji}} N_j A_{ji}}{T_{\lambda_{qp}} N_q A_{qp}}$$



[Li J. Act.Phys.Sin. (2010)]

# 氦原子发射光谱诊断

## ■ 可见光波段发射光谱诊断

- ◆ 测量设备简单、成熟
- ◆ 不易受复杂电磁场干扰
- ◆ 少维护/免维护
- ◆ 容易扩展实现时空分辨测量

## ■ 氦原子发射光谱对聚变等离子体研究具有特殊意义

- ◆ 最高的第一电离能：束诊断穿透深度深
- ◆ 聚变产物：不带来杂质污染
- ◆ 两套自旋态能级系统：三条谱线的两个谱线比可以同时确定  $T_e$  和  $N_e$

# 氦原子光谱诊断 $T_e$ 与 $N_e$ 的研究概况

## ■ 主动：束发射光谱诊断

- ◆ 最早包含至  $n = 4$  的碰撞辐射模型 [Brosda PhD Thesis (1993)]
- ◆ 发展到包含众多能级  $n = 500$  [Burgos PoP (2012)]
- ◆ 稳态解，不包含  $\text{He}^+$  与  $\text{He}^{2+}$

## ■ 被动：氦等离子体光谱诊断

[Fujimoto JQSRT (1979), Goto JQSRT (2003)]

- ◆ 适用于低温和高温等离子体
- ◆ 包含的原子能级  $n = 20$
- ◆ 添加强磁场效应等

# 国内原子发射光谱诊断现状

## ■ 光谱相关的诊断工作

- ◆ CT-6B、HT-7、HL-2A、J-TEXT, EAST 上均有研究
- ◆ 研究内容: 粒子旋转、杂质行为、粒子约束时间、输运循环等
- ◆ 未见谱线比法确定  $T_e$  和  $N_e$  的报道

## ■ 低温等离子体领域

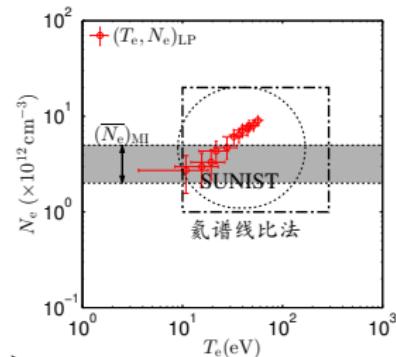
- ◆ 谱线比法应用广泛, 进行了大量研究工作 [Zhu X M JPD(2010)]
- ◆ 主要观点: 通过抓住最重要的反应过程对碰撞辐射模型进行简化  
[朱悉铭博士论文(2009)]

# 前人研究中存在的问题与课题意义

- 以碰撞辐射模型在特定参数下对上能级粒子数密度的预测为基础
  - ◆ 影响精度的因素：能级与反应过程的选择，反应截面（速率系数）
  - ◆ 结合实验进行综合考虑
- 前人在碰撞辐射模型研究中存在的问题
  - ◆ 缺乏可以直接对截面数据精度提出要求的判断标准
  - ◆ 加入越来越多的激发态能级，并不能得到更高精度的结果（能级越高其原子反应截面数据精度越差）
- SUNIST 适合进行氦原子谱线诊断研究
  - ◆ SUNIST 等离子体  $T_e$  和  $N_e$  参数与氦原子谱线比法适用范围吻合
  - ◆ SUNIST 实验可以灵活安排，适合原理验证性研究
- 在 SUNIST 上开展氦原子发射谱线诊断研究的意义
  - ◆ 建立适用于小型托卡马克装置放电的碰撞辐射模型
    - ▶ 研究包含不同的能级数时对计算结果的影响
    - ▶ 对速率系数精度要求给出直接的判断标准
  - ◆ 为 SUNIST 建立起光谱诊断手段

# 前人研究中存在的问题与课题意义

- 以碰撞辐射模型在特定参数下对上能级粒子数密度的预测为基础
  - ◆ 影响精度的因素：能级与反应过程的选择，反应截面（速率系数）
  - ◆ 结合实验进行综合考虑
- 前人在碰撞辐射模型研究中存在的问题
  - ◆ 缺乏可以直接对截面数据精度提出要求的判断标准
  - ◆ 加入越来越多的激发态能级，并不能得到更高精度的结果（能级越高其原子反应截面数据精度越差）
- SUNIST 适合进行氦原子谱线诊断研究
  - ◆ SUNIST 等离子体  $T_e$  和  $N_e$  参数与氦原子谱线比法适用范围吻合
  - ◆ SUNIST 实验可以灵活安排，适合原理验证性研究
- 在 SUNIST 上开展氦原子发射谱线诊断研究的意义
  - ◆ 建立适用于小型托卡马克装置放电的碰撞辐射模型
    - ▶ 研究包含不同的能级数时对计算结果的影响
    - ▶ 对速率系数精度要求给出直接的判断标准
  - ◆ 为 SUNIST 建立起光谱诊断手段



# 提纲

## 1 引言

- 课题背景与意义
- 课题研究思路与内容

## 2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

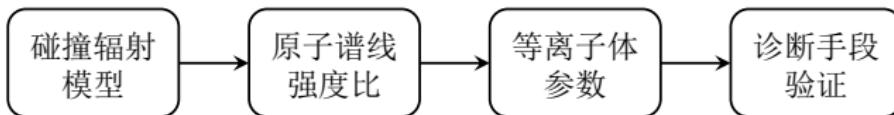
## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

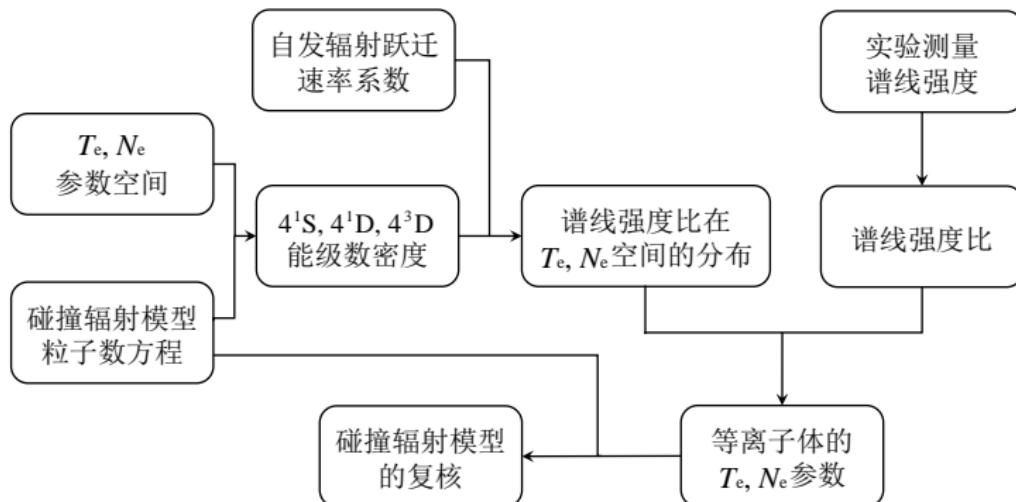
## 5 致谢

# 课题研究思路与各部分内容的关系

## ■ 研究思路与内容



## ■ 研究内容之间的详细关系



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断  $T_e$  和  $N_e$  谱线比法的建立

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断  $T_e$  和  $N_e$  谱线比法的建立

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 氦放电等离子体激发态数密度分布特点与能级结构

SUNIST 碰撞辐射模型 He 原子能级图

## ■ 临界能级主量子数

[H.R. Griem (1964)]

$$n_c = \left( \frac{8 \cdot 10^{17}}{N_e} \right)^{2/17} \left( \frac{kT_e}{\chi_H} \right)^{1/17}$$

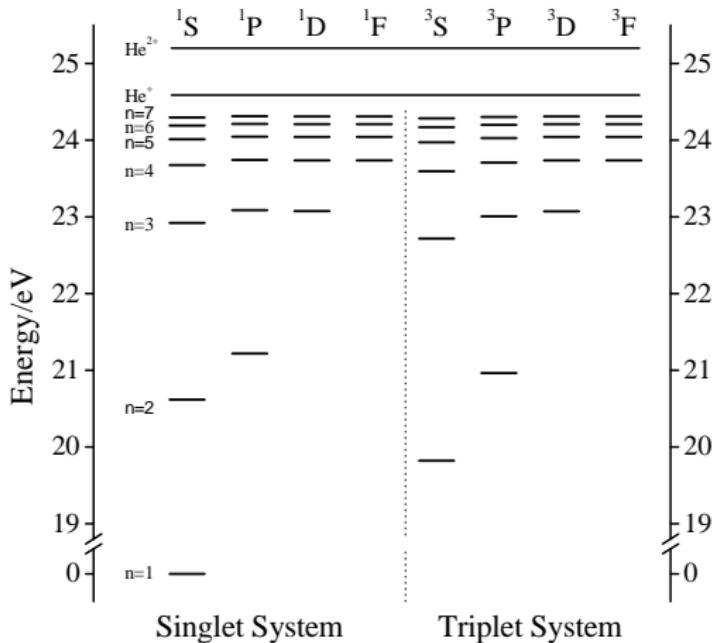
## ■ 氦激发态能级分布

[Fujimoto JQSRT (1979)]

- ◆  $N_p/g_p \propto n^{-0.5}$  ( $n < n_c$ )
- ◆  $N_p/g_p \propto n^{-6}$  ( $n > n_c$ )

## ■ SUNIST 等离子体

- ◆ 高温低密度:  $n_c \simeq 6$
- ◆ 低温高密度:  $n_c \simeq 4$



# 电子碰撞与重粒子碰撞过程的反应速率

$$\frac{dN_p}{dt} = -n_{e,X} \cdot N_p \cdot \langle v_{e,X} \cdot \sigma_{pq} \rangle$$

# 电子碰撞与重粒子碰撞激发过程的选择

反应过程	$n_{e,X}$	$N_p$	$v_{e,X}$	$\sigma_{pq}$	反应过程量级
e-基态	+6	0	0	0	+6
e-亚稳态	+6	-1	0	0	+5
e-普通激发态	+6	-4	0	0	+2
X-基态	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态	+4	-4	-3	-3	-6

# 电子碰撞与重粒子碰撞电离过程的选择

反应过程	$n_{e,X}$	$N_p$	$v_{e,X}$	$\sigma_{pq}$	反应过程量级
e-基态	+6	0	0	+1	+7
e-亚稳态	+6	-1	0	+1	+6
e-普通激发态	+6	-4	0	+1	+3
X-基态	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态	+4	-4	-3	-3	-6
e-基态 (双电离)	+6	0	0	-2	+4
e-亚稳态 (双电离)	+6	-1	0	-2	+3
e-普通激发态 (双电离)	+6	-4	0	-2	0
X-基态 (双电离)	+4	0	-3	-3	-2
X-亚稳态 (双电离)	+4	-1	-3	-3	-3
X-普通激发态 (双电离)	+4	-4	-3	-3	-6

## 速率方程：基态

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} = & - \left\{ \sum_{q>1} C_{1q} + S_{\text{He}^+}(1) + S_{\text{He}^{2+}}(1) \right\} N_e N_1 \\ & + \sum_{q>1} \{C_{q1} N_e + A_{q1}\} N_q \\ & + \{\beta_{\text{He}^+}(1) + \beta_{\text{He}^+, d}(1)\} N_e N_{\text{He}^+}\end{aligned}$$

- 主要损失过程：电子碰撞激发与电离
- 主要产生过程：电子碰撞退激发、激发态自发辐射跃迁、 $\text{He}^+$  离子的辐射复合 (radiation recombination) 与双电子复合 (dielectric recombination)

# 速率方程：亚稳态 ( $2^1S$ 和 $2^3S$ ) 与普通激发态

$$\begin{aligned}\frac{dN_p}{dt} = & - \left\{ \sum_{q \neq p} C_{pq} N_e + \sum_{q < p} A_{pq} + S_{He^+}(p) N_e \right\} N_p \\ & + \left\{ \sum_{q \neq p} C_{qp} N_e + \sum_{q > p} A_{qp} \right\} N_q \\ & + \beta_{He^+}(p) N_e N_{He^+}\end{aligned}$$

- 主要损失过程：电子碰撞激发/退激发、电离与自发辐射跃迁
- 主要产生过程：电子碰撞激发/退激发、 $He^+$  辐射复合与自发辐射跃迁

## 速率方程: $\text{He}^+$ 离子

$$\begin{aligned}\frac{dN_{\text{He}^+}}{dt} = & - \left\{ \sum_p \beta_{\text{He}^+}(p) + \beta_{\text{He}^+, \text{d}}(1) + S_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) \right\} N_e N_{\text{He}^+} \\ & + N_e \sum_p S_{\text{He}^+}(p) N_p + \beta_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_e N_{\text{He}^{2+}}\end{aligned}$$

- 主要损失过程: 电子碰撞电离、辐射复合与双电子复合过程
- 主要产生过程: 激发态碰撞电离、 $\text{He}^{2+}$  复合

## 速率方程: $\text{He}^{2+}$ 离子

$$\frac{dN_{\text{He}^{2+}}}{dt} = -\beta_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_e n_{\text{He}^{2+}} + \left\{ S_{\text{He}^{2+}}(1) N_1 + S_{\text{He}^{2+}}(\text{He}^+) N_{\text{He}^+} \right\} N_e$$

- 主要损失过程: 电子碰撞复合至  $\text{He}^+$  离子
- 主要产生过程: 基态原子与  $\text{He}^+$  离子的电子碰撞电离

## 准稳态近似处理

对 SUNIST 中等离子体的各时间常数分析 [H.P. Summers PPCF (2006) ]:

原子内在固有时间常数: 辐射、跃迁相关

$$\tau_{\text{rad-ion}} \sim 10^{-13} \text{ s} < \tau_{\text{ord-rad}} \sim \frac{10^{-8}}{z^4} \text{ s} < \tau_{\text{meta-rad}} \sim \frac{10^1}{z^8} \text{ s}$$

外在时间常数: 受  $T_e$ 、 $N_e$  影响

$$\tau_{e-e} \sim 4 \mu\text{s} < \tau_{i-i} \sim 20 \mu\text{s} < \tau_{e-ion} \sim 1.4 \mu\text{s} - 140 \mu\text{s} < \tau_{i-e} \sim 2 \text{ ms}$$

与等离子体行为相关时间参数  $\tau_{\text{plasma}}$  对比

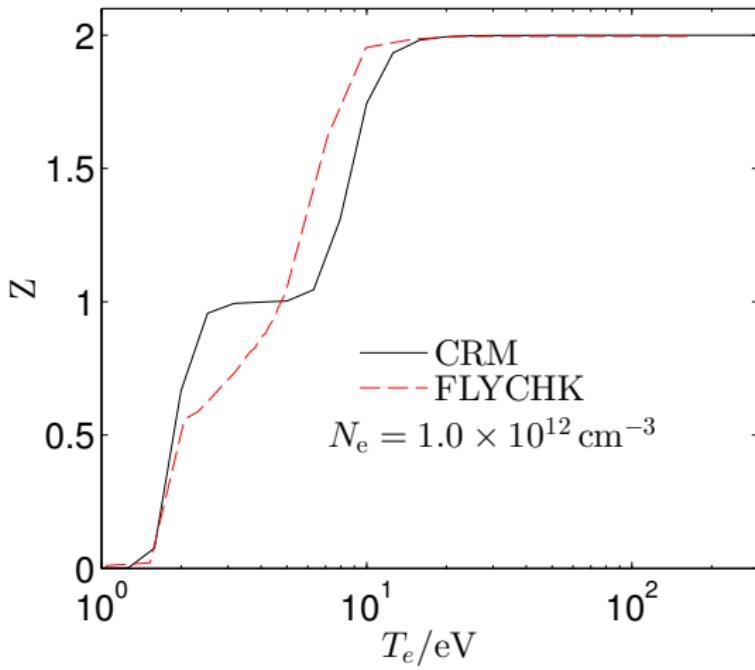
$$\tau_{\text{ord-rad}} < \tau_{e-e,i-i} < \tau_{e-ion} < \tau_{\text{plasma}}$$

$\tau_{\text{plasma}}$ : 等离子体在空间尺度上扩散、输运等时间常数

### ■ 准稳态近似处理:

- ◆ 局域计算中, 不考虑粒子扩散输运等过程
- ◆ 联立速率方程, 求其稳态解
- ◆ 放电平衡段适用

# 等效电荷数计算结果与 FLYCHK 对比



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

■ 碰撞辐射模型的建立

■ 碰撞辐射模型的研究

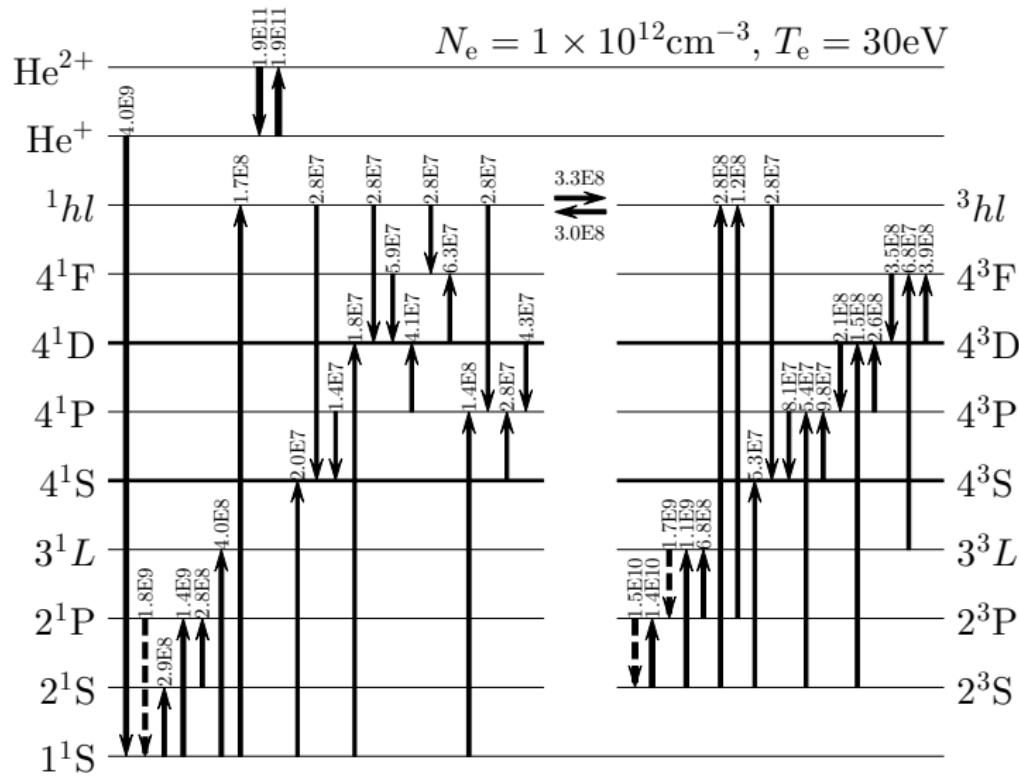
■ 诊断  $T_e$  和  $N_e$  谱线比法的建立

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



# 速率系数不确定性：速率系数不确定性传递函数

对于普通激发态能级，电子碰撞电离与复合过程均不超过 10%

$$\Rightarrow N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i = N_e N_p \sum_{i \neq p} C_{pi} + N_p \sum_{i < p} A_{pi}$$

$$\Rightarrow \sigma_{N_p} = \frac{dN_p}{N_p} = \sigma \left( N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i \right) + \sigma \left( N_e \sum_{i \neq p} C_{pi} + \sum_{i < p} A_{pi} \right)$$

$$\Rightarrow \sigma_{N_p} = E_{jp} \sigma_{C_{jp}} \simeq 2 \frac{f_{jp}}{F_{p,\text{in}}} \sigma_{C_{jp}}$$

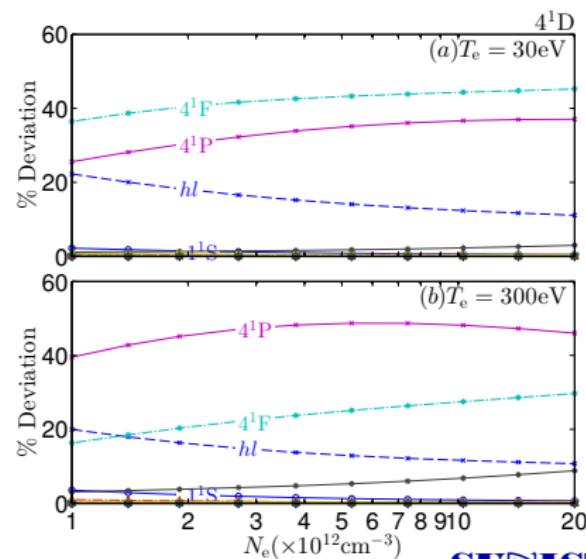
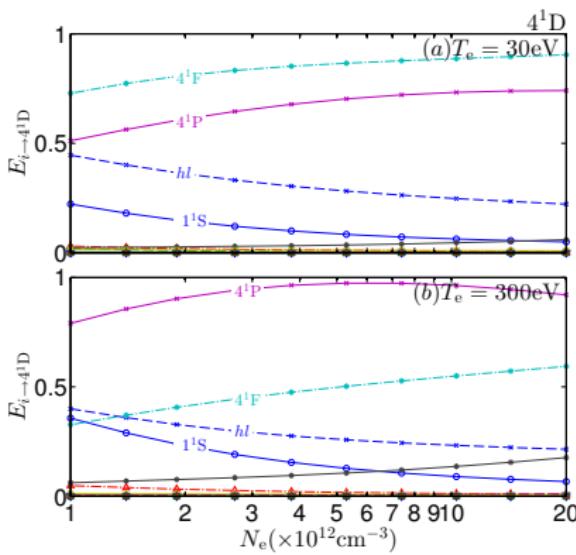
## ■ $E_{jp}$ 的物理意义

- ◆ 该过程占能级总产生速率的比例越重，其速率系数不确定性至激发态粒子数密度计算结果的传递越明显
- ◆ 其逆过程的粒子流速率相应变化，则会出现 2 倍的系数
- ◆ 据此，可以直接对速率系数准确性提出具体要求

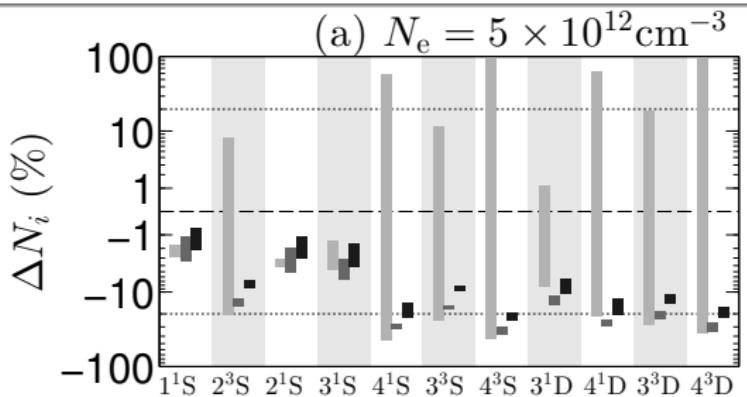
# 速率系数不确定性：不确定性传递计算结果

- 对相同主量子数的相邻能级、基态和高能级的总和的速率系数要求高
- 相邻能级速率系数单一变化时，对模型计算结果影响可达 40%

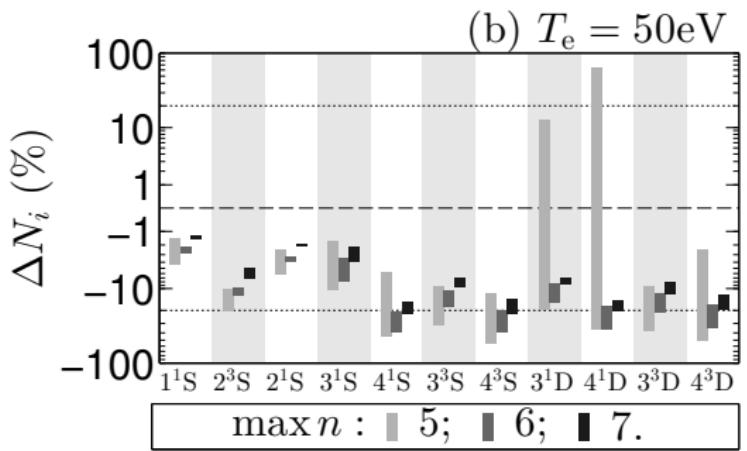
跃迁类型	误差
基态→单重态	±10%
基态→三重态	±15%
亚稳态→其他	±20%
其他过程	±50%



# 模型中包含的能级对激发态数密度计算结果的影响



$$\Delta N_i^{\max n} = 100\% \times \frac{N_i^{\max n} - N_i^{\max n-1}}{N_i^{\max n-1}}$$



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

- 碰撞辐射模型的建立
- 碰撞辐射模型的研究
- 诊断  $T_e$  和  $N_e$  谱线比法的建立

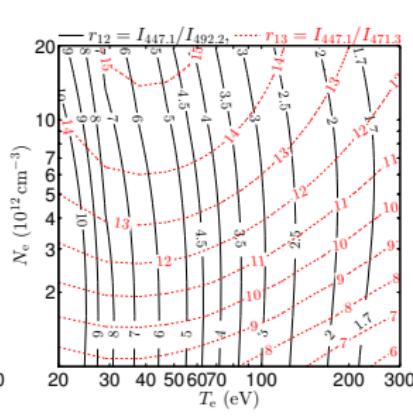
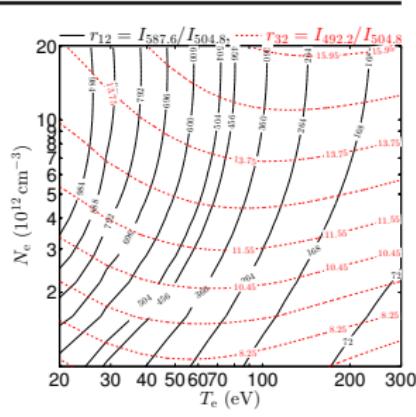
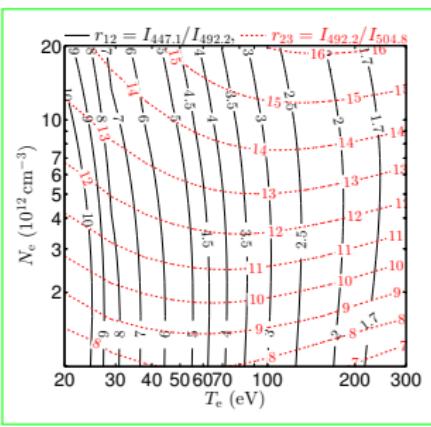
## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

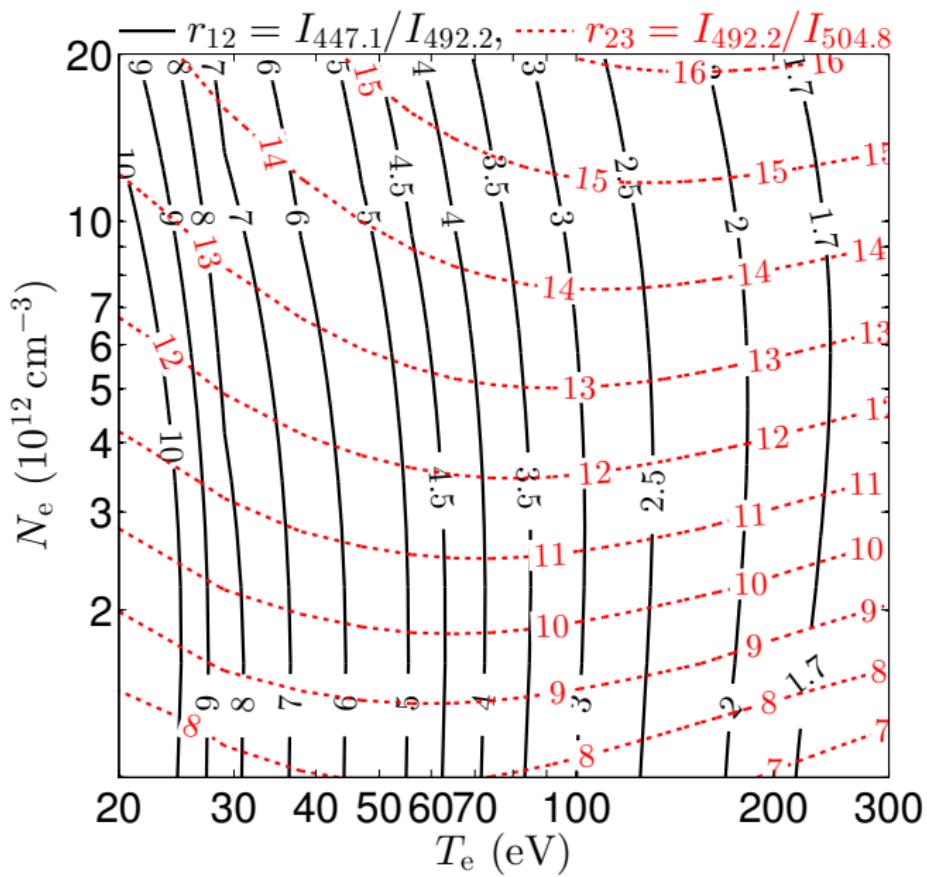
## 5 致谢

# 谱线比选择

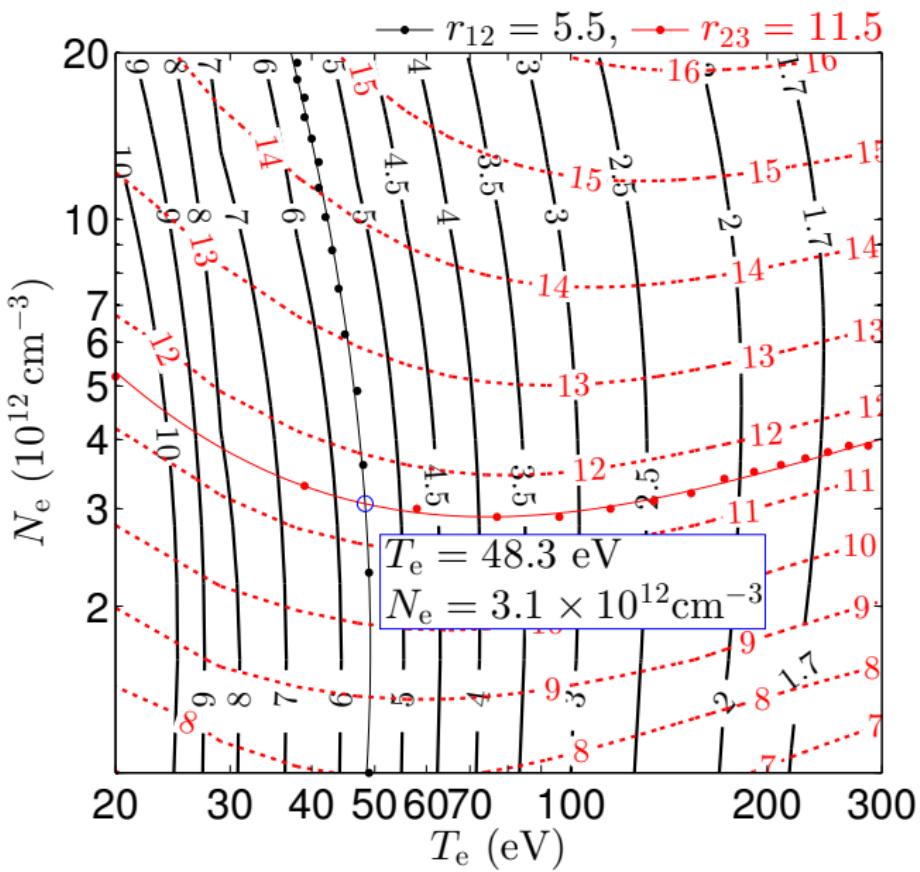
跃迁	$\lambda_{q \rightarrow p}$ (nm)	$A_{q \rightarrow p}^{\text{eff}}$ ( $10^{10} \text{ s}^{-1}$ )
$2^1S \leftarrow 3^1P$	501.6	1.34
$2^1S \leftarrow 4^1P$	396.5	0.70
$2^1P \leftarrow 4^1S$	504.8	0.68
$2^1P \leftarrow 4^1D$	492.2	1.99
$2^3S \leftarrow 3^3P$	388.9	0.95
$2^3P \leftarrow 3^3D$	587.6	7.07
$2^3P \leftarrow 4^3S$	471.3	0.95
$2^3P \leftarrow 4^3D$	447.1	2.46
$2^3P \leftarrow 5^3S$	412.1	0.45



## 碰撞辐射模型对谱线比的预测



# 谱线比法确定 $T_e$ 和 $N_e$



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体  $T_e$  与  $N_e$  的发射光谱诊断

■ SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排

■ 氮原子发射光谱测量结果

■ 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$

■ 碰撞辐射模型的复核

■ 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

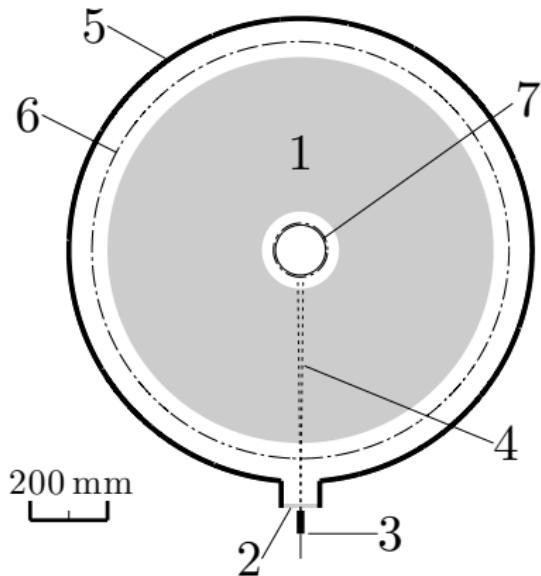
4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

# 主要光谱测量设备

- 两台单色仪：对两条谱线进行同时测量
  - ◆ 可用谱线范围：380 nm – 650 nm
  - ◆ 焦距：1 m；光栅：2400 g/mm@400 nm；波长分辨率：0.004 nm；色散：0.4 nm/mm
  - ◆ 光电倍增管：单点，但响应强，满足时间分辨测量要求
- 标定
  - ◆ 汞灯：谱线准确度、分辨率
  - ◆ 钨灯：仪器的整体响应
- 信号
  - ◆ 取样电阻优化
  - ◆ 屏蔽以降低噪声
  - ◆ PMT 电源改造，消除来自电源干扰

# 光谱测量安排



跃迁	$\lambda_{q \rightarrow p}$ (nm)	$A_{q \rightarrow p}^{\text{eff}}$ ( $10^7 \text{ s}^{-1}$ )
$2^1\text{S} \leftarrow 3^1\text{P}$	501.6	1.34
$2^1\text{S} \leftarrow 4^1\text{P}$	396.5	0.70
$2^1\text{P} \leftarrow 4^1\text{S}$	504.8	0.68
$2^1\text{P} \leftarrow 4^1\text{D}$	492.2	1.99
$2^3\text{S} \leftarrow 3^3\text{P}$	388.9	0.95
$2^3\text{P} \leftarrow 3^3\text{D}$	587.6	7.07
$2^3\text{P} \leftarrow 4^3\text{S}$	471.3	0.95
$2^3\text{P} \leftarrow 4^3\text{D}$	447.1	2.46
$2^3\text{P} \leftarrow 5^3\text{S}$	412.1	0.45

# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

■ SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排

■ 氮原子发射光谱测量结果

■ 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$

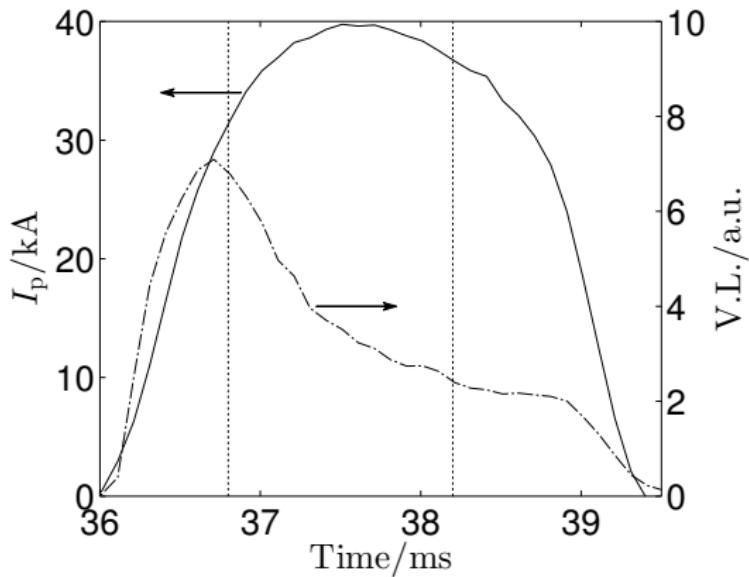
■ 碰撞辐射模型的复核

■ 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

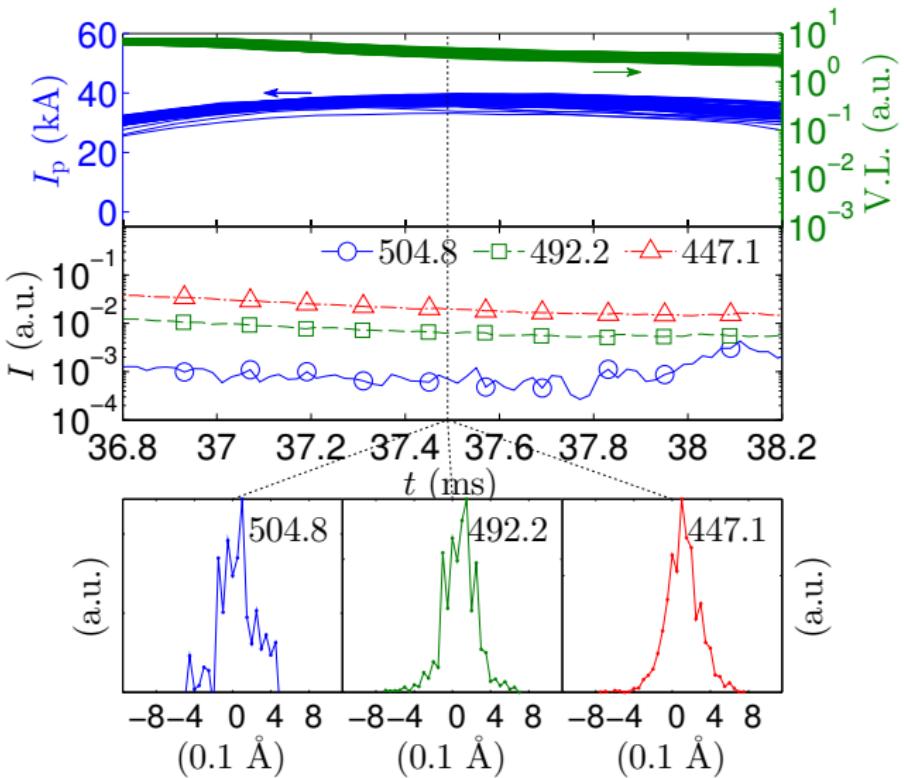
## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

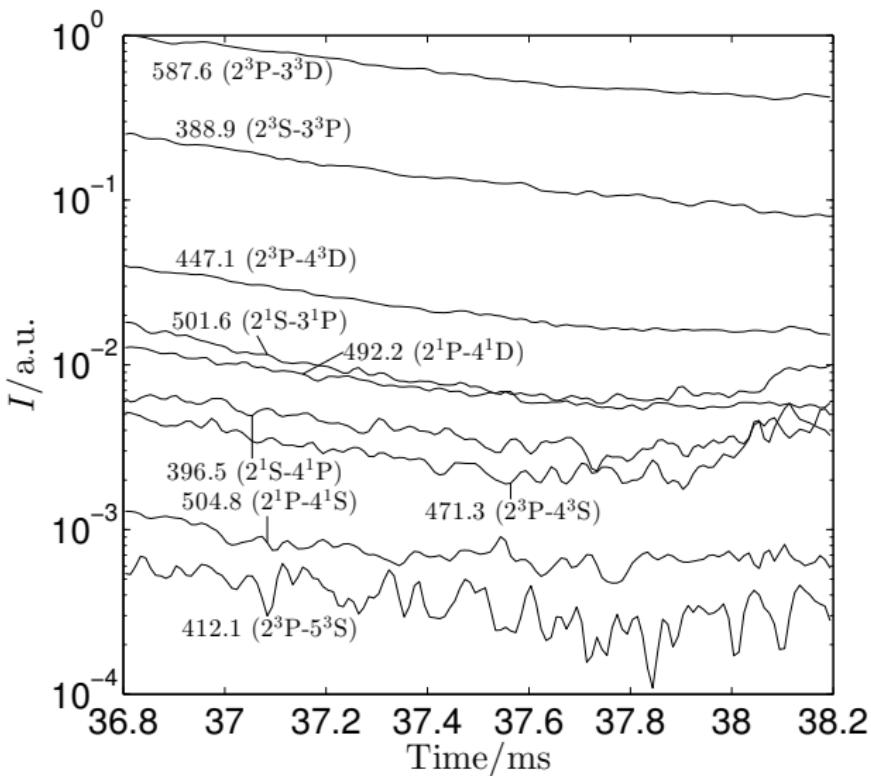
# 氦放电等离子体电流与可见光信号



# 谱线测量方法



# 谱线测量结果



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围内氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

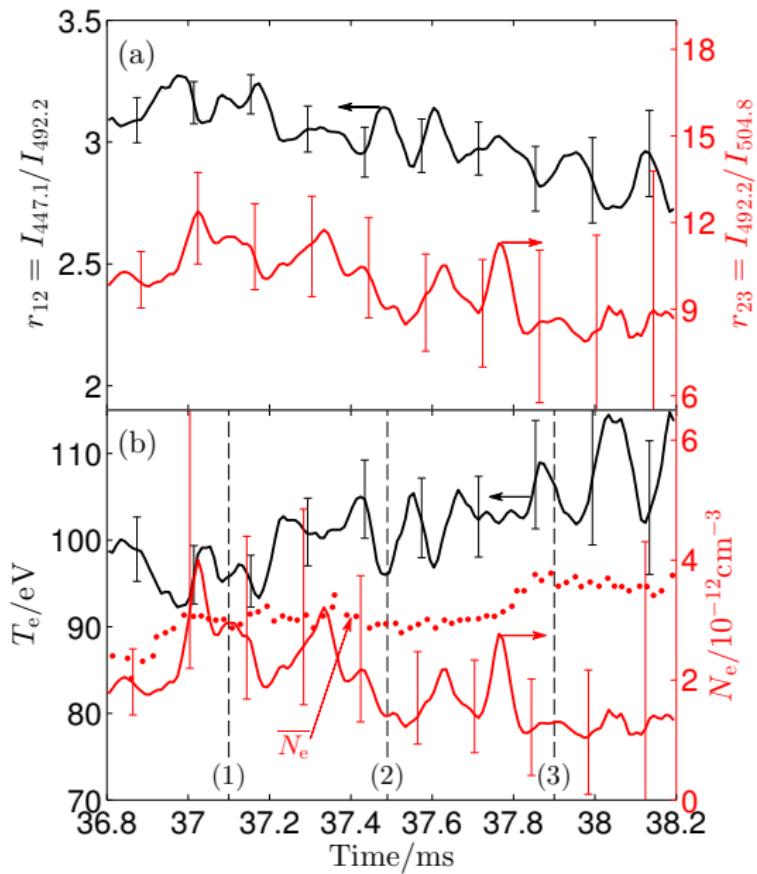
## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 谱线比法确定 $T_e$ 和 $N_e$



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

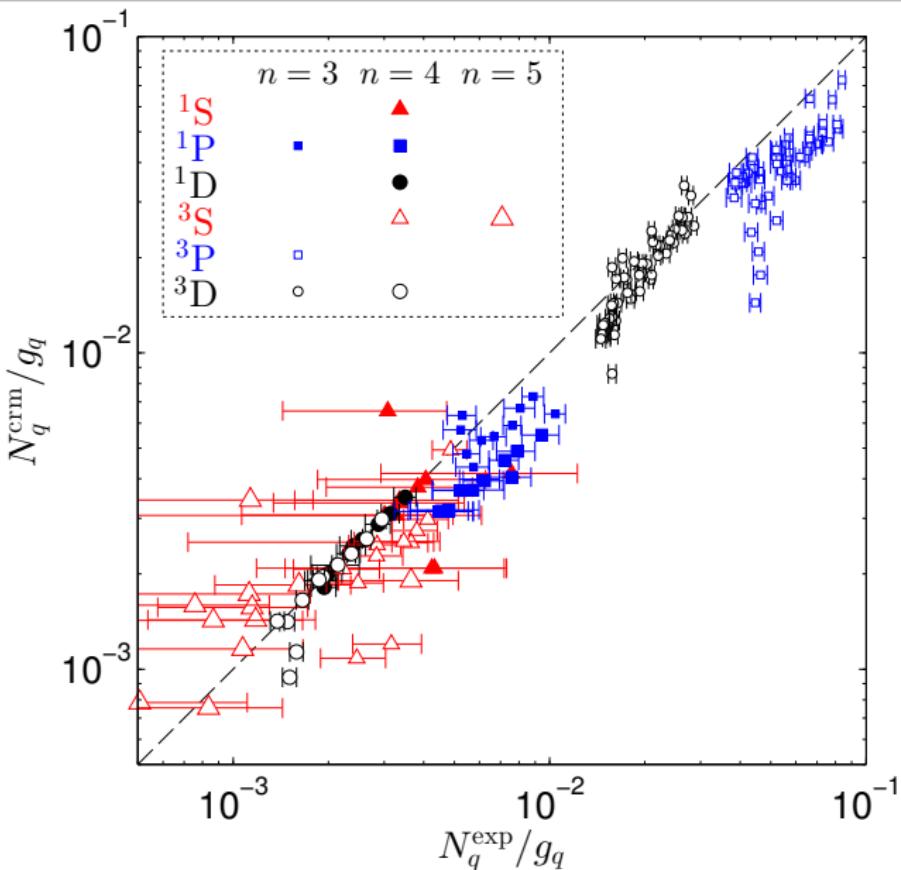
## 3 SUNIST 氖放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氖原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

## 5 致谢

# 激发态数密度：测量值与诊断所得参数下模型计算值



# 提纲

## 1 引言

## 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

## 3 SUNIST 氮放电等离子体 $T_e$ 与 $N_e$ 的发射光谱诊断

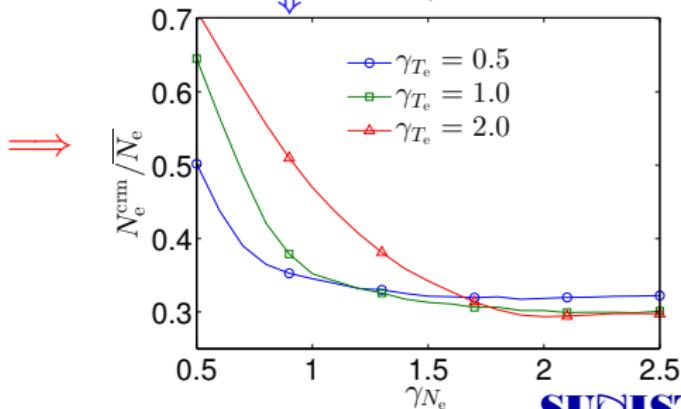
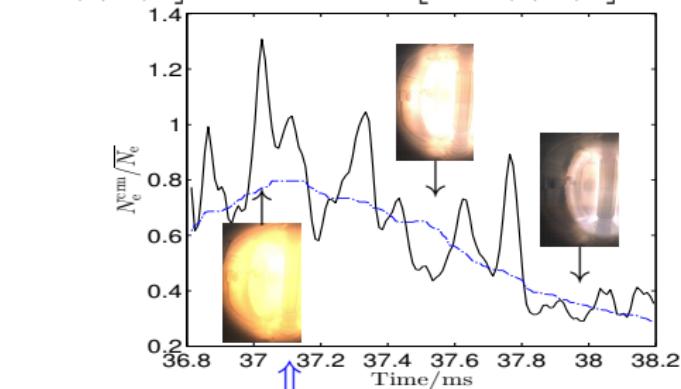
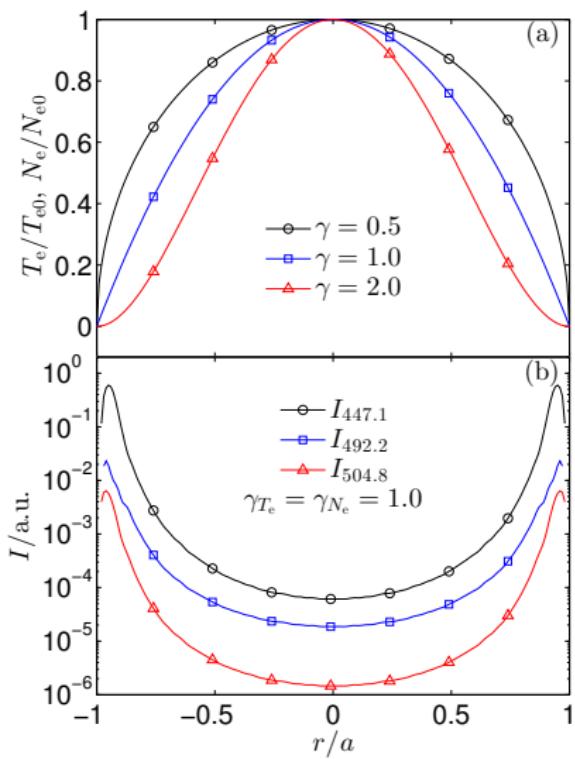
- SUNIST 原子发射光谱诊断实验测量系统与安排
- 氮原子发射光谱测量结果
- 谱线比法诊断  $T_e$  和  $N_e$
- 碰撞辐射模型的复核
- 光谱测量弦积分特性与谱线强度涨落的初步研究

## 4 总结、课题主要创新与不足之处

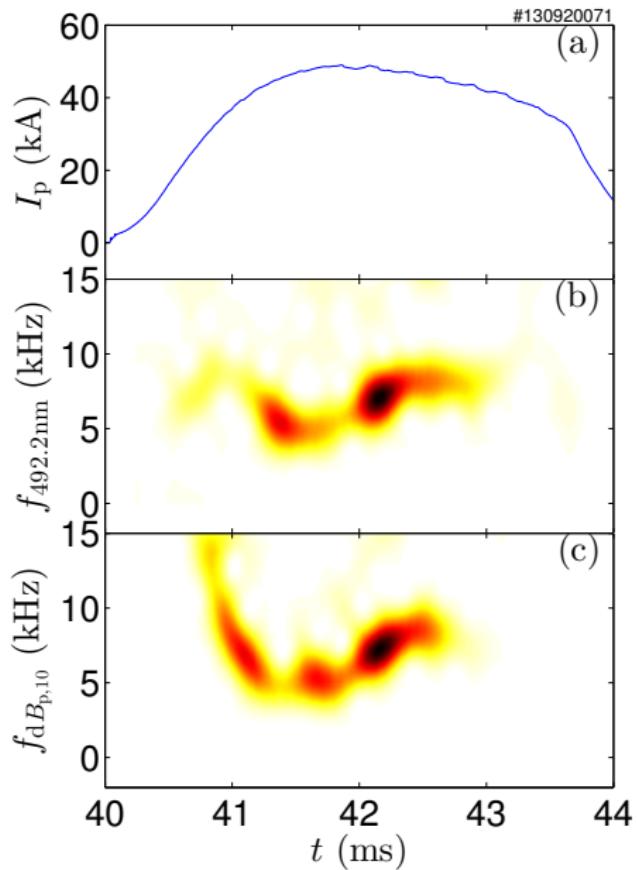
## 5 致谢

# 谱线比与微波干涉仪测量的 $N_e$ 与其空间分布的相关性

假设抛物线分布条件:  $N_e = N_{e0} [1 - (r/a)^2]^{\gamma_{N_e}}$ ,  $T_e = T_{e0} [1 - (r/a)^2]^{\gamma_{T_e}}$



# 谱线涨落与磁探针信号涨落频谱分析



# 提纲

- 1 引言
- 2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法
- 3 SUNIST 氮放电等离子体  $T_e$  与  $N_e$  的发射光谱诊断
- 4 总结、课题主要创新与不足之处
- 5 致谢

# 课题完成的工作内容与主要创新

## ■ 课题完成的工作

### ◆ SUNIST 氖放电等离子体光谱诊断

- ▶ 碰撞辐射模型：适用于以下参数内，可忽略其他杂质影响的等离子体
  - $20\text{eV} < T_e < 300\text{eV}$
  - $1.0 \times 10^{12}\text{cm}^{-3} < N_e < 2.0 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$
- ▶ 光谱诊断实验

## ■ 课题主要创新

### ◆ 碰撞辐射模型方面

- ▶ 提出速率系数不确定性传递函数，可以对速率系数精度直接提出要求
- ▶ 给出结论：对具有 SUNIST 参数的等离子体碰撞模型，当  $\max n = 7$  时即给出可以接受的结果

### ◆ 实验方面

- ▶ 观察到以下结果
  - 谱线比法与微波干涉仪测量的  $N_e$  之比与其分布峰化的相关性
  - 光谱信号与磁探针信号具有一致的涨落行为

# 课题的不足之处与后续工作展望

## ■ 碰撞辐射模型的研究

- ◆ 不足：仅利用了模型的稳态解
- ◆ 后续工作：与实验结合，加入时变解，考虑非麦氏电子温度分布、能量粒子输运循环等因素，扩展适用范围至放电起始与结束阶段

## ■ 光谱分析方面

- ◆ 不足：谱线展宽、波长位移诊断
- ◆ 后续工作：建立新的实验设备，条件成熟时可以开展

## ■ SUNIST 实验基础方面

- ◆ 不足：不具备空间分布诊断能力
- ◆ 后续工作：建立光电二极管阵列探测系统，结合断层反演技术以实现空间分辨诊断

# 课题论文发表情况

## ■ SUNIST 上谱线比法的应用

Huiqiao Xie, Zhe Gao, Yi Tan, et al. Electron temperature and density determination in helium plasmas of SUNIST using the optical emission spectrum line-ratio method. The Joint Meeting of 5th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori & 16th International Workshop on Spherical Torus (ISTW2011) & 2011 US-Japan Workshop on ST Plasma, 2011: Toki

## ■ 实验基础建设：改善放电重复性

Xie Huiqiao, Tan Yi, Ke Rui, et al. Analysis of the gas puffing performance for improving the repeatability of Ohmic discharges in the SUNIST spherical tokamak. In press. (已被 Plasma Science and Technology 录用. SCI 源刊.)

## ■ 整体工作（包括了碰撞辐射模型中包含激发态能级数的研究等）

谢会乔, 谭熠, 刘阳青, 等. SUNIST 氦放电等离子体的碰撞辐射模型及其在谱线比法诊断的应用. 物理学报, 2014 63(12): 125203. (SCI 源刊)

# 提纲

1 引言

2 SUNIST 参数范围下氮原子的碰撞辐射模型与谱线比法

3 SUNIST 氮放电等离子体  $T_e$  与  $N_e$  的发射光谱诊断

4 总结、课题主要创新与不足之处

5 致谢

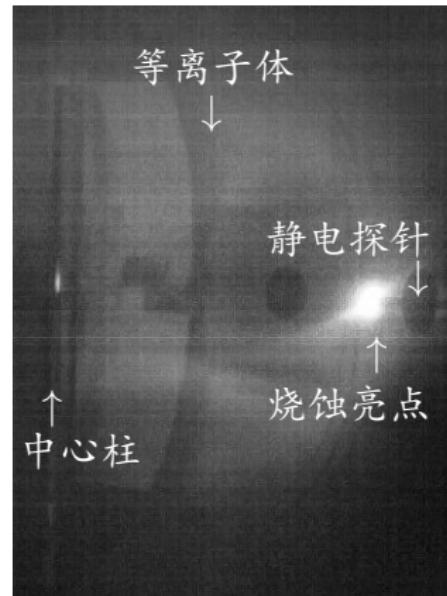
# 致谢

- 感谢高喆老师、蒲以康老师、王文浩老师、谭熠老师、解丽凤老师的教导、支持与鼓励
- 感谢王龙老师、杨宣宗老师和冯春华老师的关心爱护与帮助
- 感谢张良、曾龙、赵爱慧、刘阳青、姜艳铮、柴松以及其他师兄弟姐妹的帮助与在实验室的陪伴
- 感谢工物系、西南物理研究院、等离子体所、工程物理研究院给予过帮助的所有老师和同学
- 感谢工作中在仪器制作、安装和调试中给过帮助的所有相关工程技术人员
- 感谢家人的爱护、支持与陪伴，尤其是张英女士
- 感谢学习生活中出现过的所有人士
- 深切怀念何也熙老师

# SUNIST 等离子体电子温度与密度的 原子发射光谱诊断

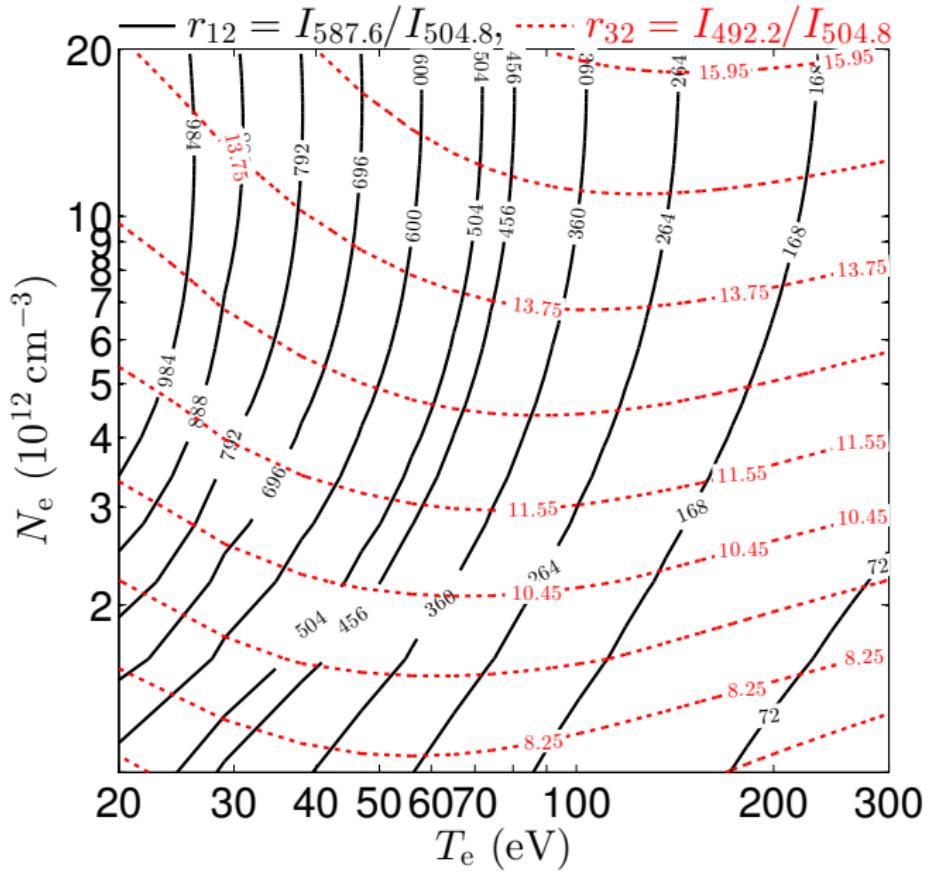
感谢各位老师和同学出席！

# SUNIST 放电时静电探针烧蚀情况

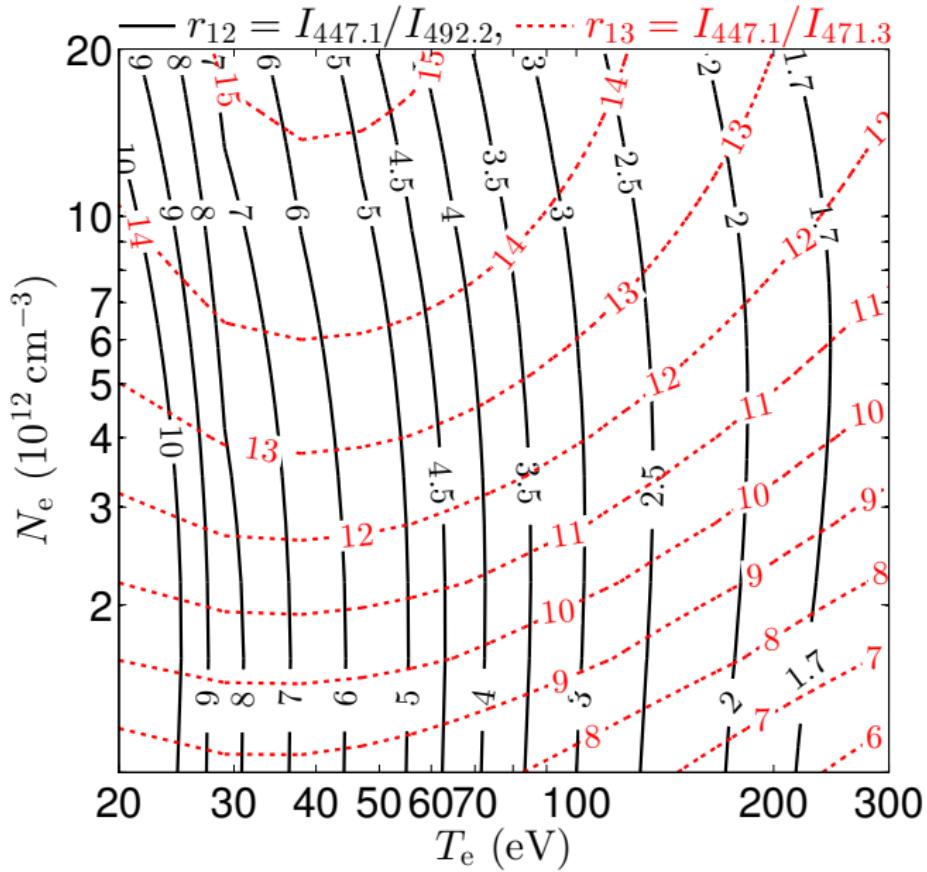


SUNIST 静电探针烧蚀  
#121123020

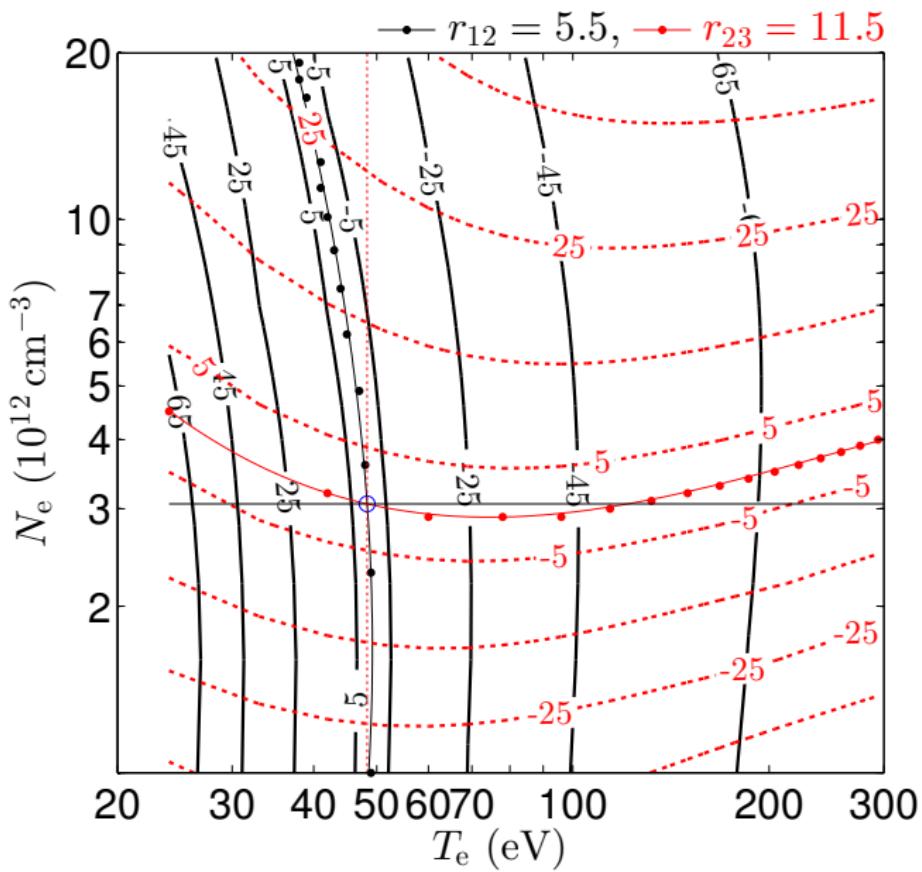
# 碰撞辐射模型对谱线比的预测：其他谱线比



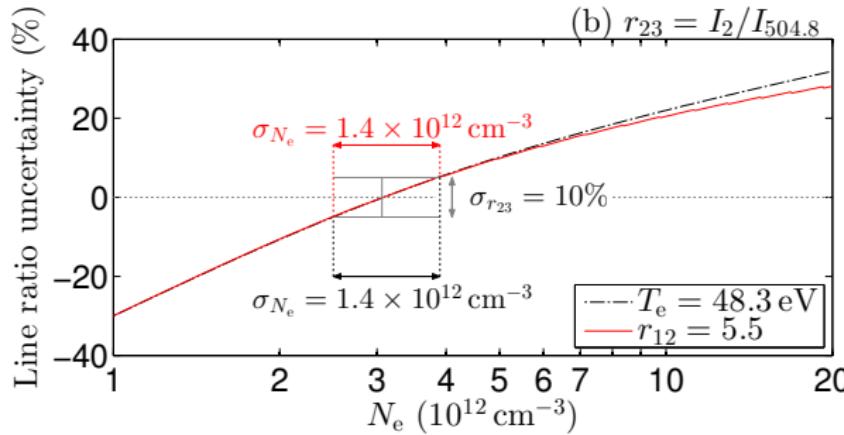
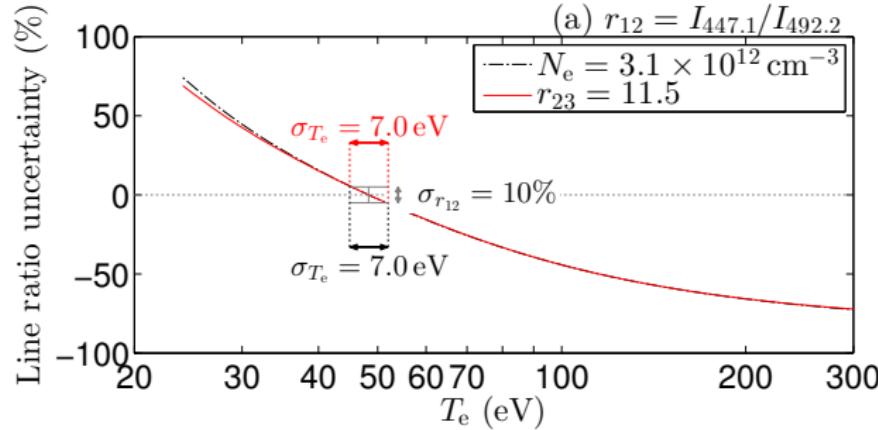
# 碰撞辐射模型对谱线比的预测：其他谱线比



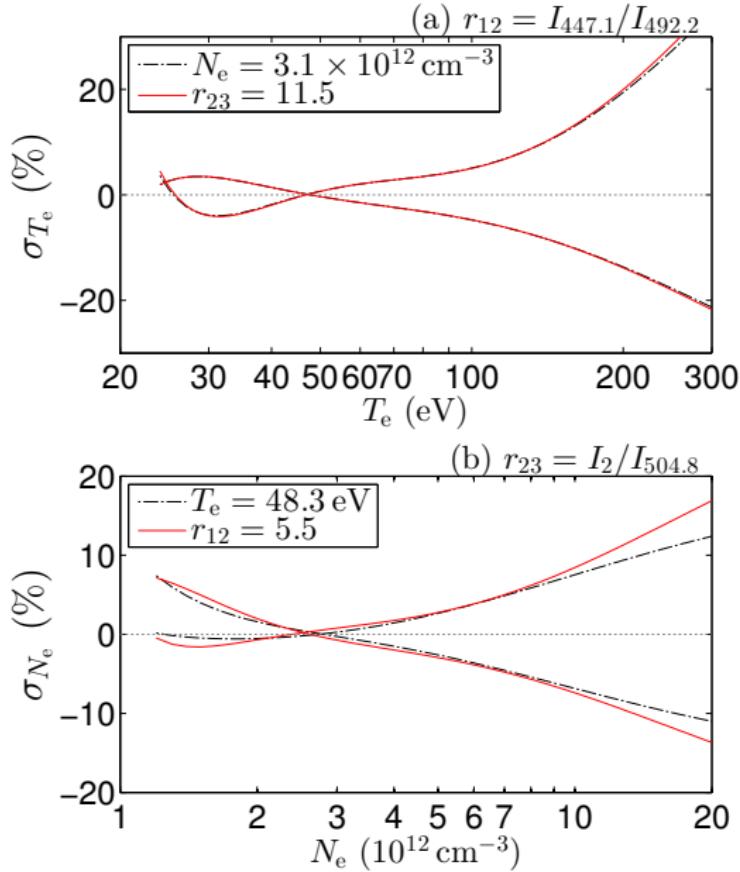
## $N_e$ and $T_e$ Determination (6): Error Estimation Routes



# $N_e$ and $T_e$ Determination (7): Error Propagation



## $N_e$ and $T_e$ Determination (8): Error Routes Comparison

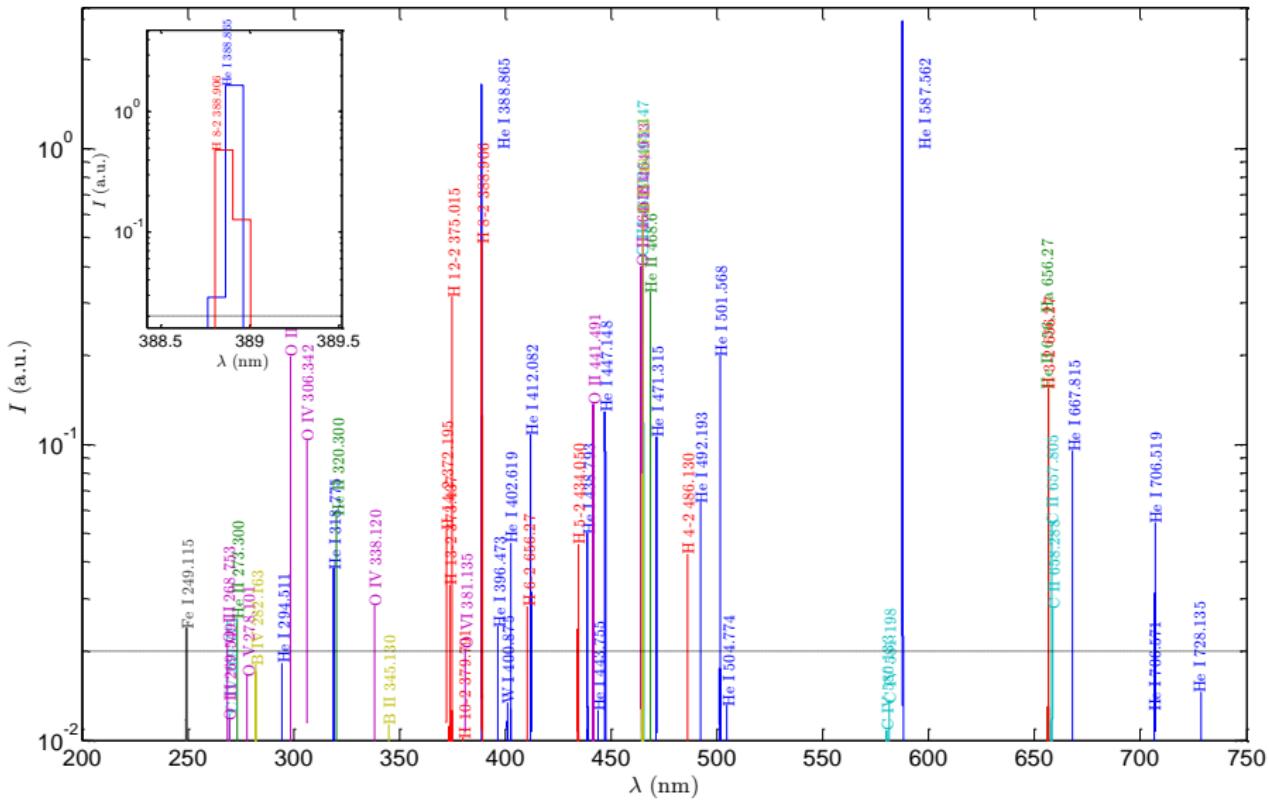


# 对谱线比计算结果的影响

- 对谱线比计算结果的影响 [Burgos PoP (2012)]:

$$\begin{aligned}\sigma_{r^{\text{mod}}} \simeq & \pm r^{\text{mod}} \\ & \times \sqrt{2 \left( \frac{\delta n}{n} \right)^2 (1 - \gamma_{qj})}\end{aligned}$$

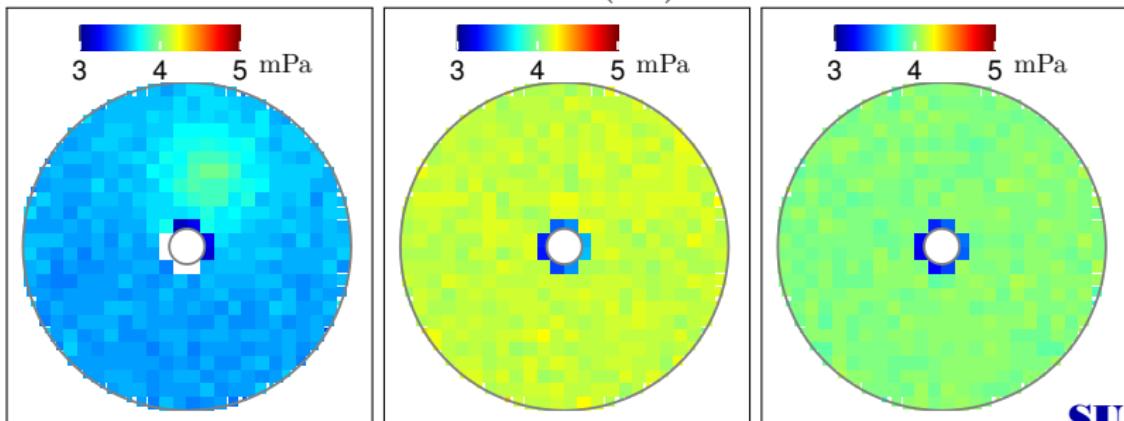
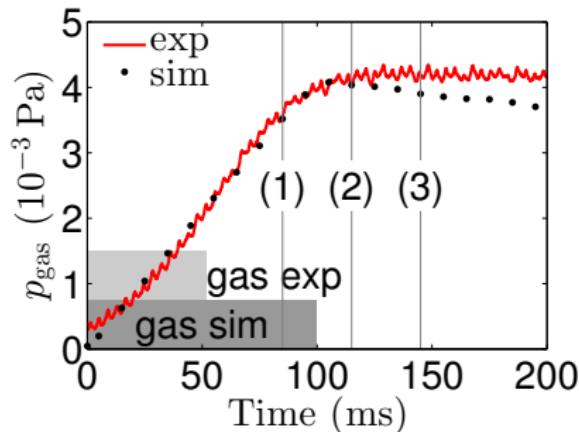
# 实测：氦原子谱线比其他原子谱线强一个数量级以上



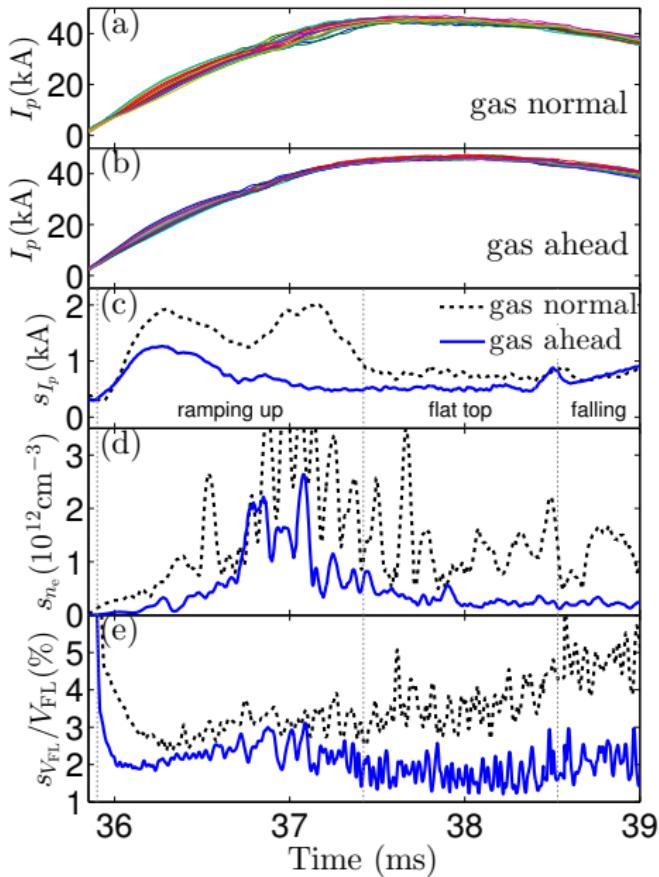
## 提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

# 脉冲进气时真空室内气压分布变化规律



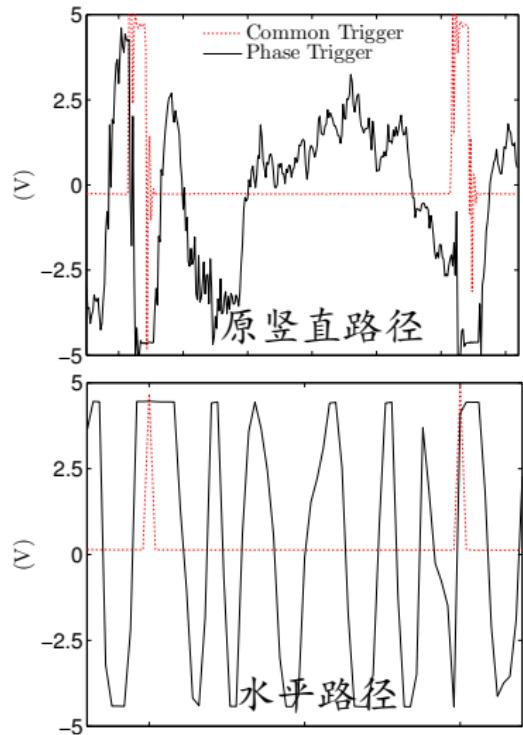
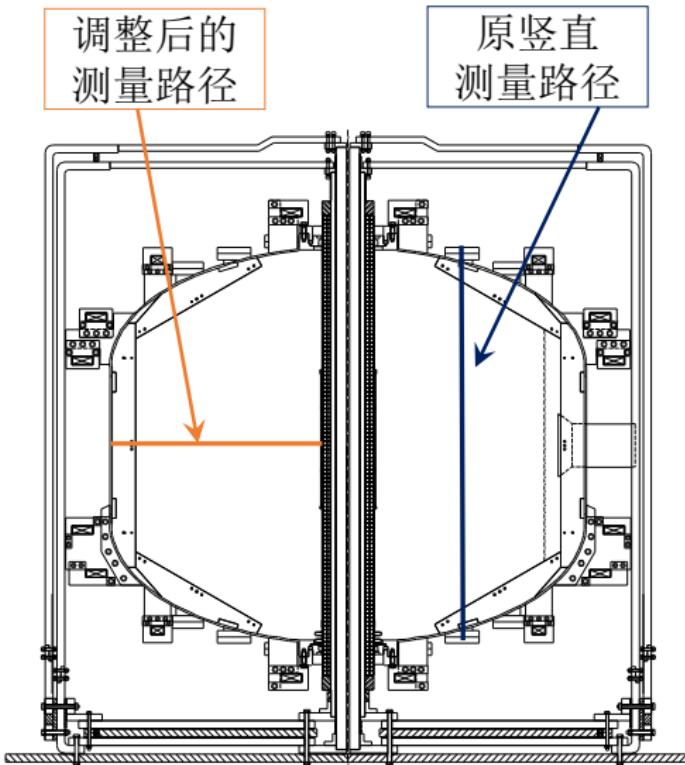
# 调整脉冲进气时序对放电重复性的改善



## 提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

# 微波干涉仪测量路径的确定



## 提纲

- 对 SUNIST 放电重复性的改善
- SUNIST 上 94 GHz 微波干涉仪
- SUNIST 数据采集与处理服务系统

# SUNIST 数据采集与处理服务系统：目的与意义

## ■ 原有数据采集系统（WLYXZ）

- ◆ 采集通道数少：共32通道
- ◆ 软件环境不稳定（DOS@Windows98），容易丢失数据与宕机
- ◆ 数据管理与访问基于文件名

## ■ SUNIST 装置特性

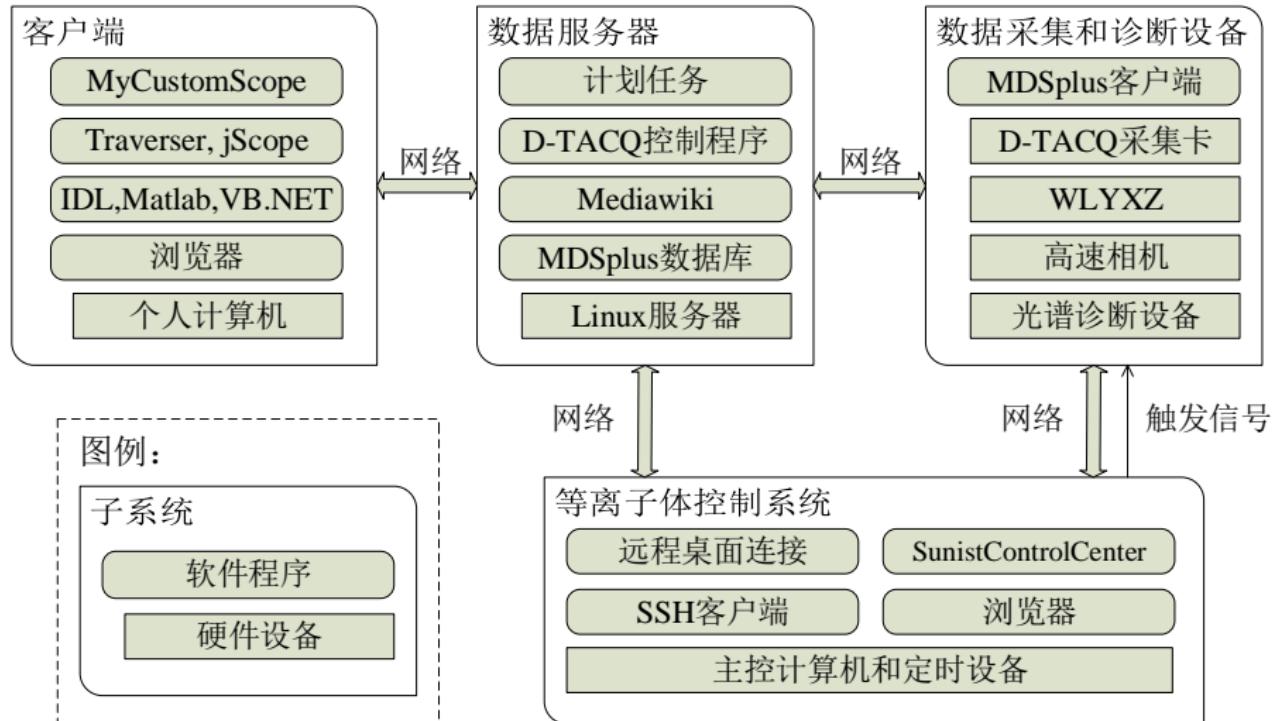
- ◆ 实验数据量大，不断增加
- ◆ 每通道数据量随采集时间、频率等变化
- ◆ 实验人员频繁访问处理数据

## ■ 新的数据采集与处理服务系统

- ◆ 信号采集能力升级，与SUNIST升级后众多诊断设备整合匹配
- ◆ 基于统一管理数据，系统软件环境稳定
- ◆ 分布式访问数据，提供多种编程接口，多人协作参与实验能力

# 升级后的 SUNIST 数据采集与处理服务系统 (SDSup)

SUNIST Data acquisition and processing Serving system Upgrade



# Time Constants

intrinsic group  $\tau_a \sim 10^{-13} \text{ s} \ll \tau_o \sim \frac{10^{-8}}{z^4} \text{ s} \ll \tau_m \sim \frac{10^1}{z^8} \text{ s}$

extrinsic group  $\tau_{\text{ion,rec}} \gg \tau_{i-e} \gg \tau_{i-i} \gg \tau_{e-e}$

to be compared with  $\tau_{\text{plasma}}$   $\tau_{\text{plasma}} \sim \tau_g \sim \tau_m \gg \tau_o \gg \tau_{e-e}$

## ■ quasi-equilibrium:

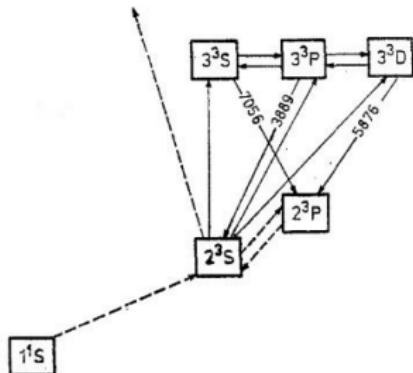
- ◆ partially de-coupled from transport problem - local calculation
- ◆ metastable, ground level, ions are the dominant populations

# Plasma Conditions of Helium Discharges

- $T_e: \sim 200\text{eV}$ ,  $N_e: 5 \times 10^{12} - 3 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$
- Particle species: He atom,  $\text{He}^+$ ,  $\text{He}^{+2}$ ,  $\text{H}_2$ , H atom,  $\text{H}^+$
- Reactions:
  - ◆ neutral atom: excitation, deexcitation, ionization, double ionization
  - ◆  $\text{He}^+$ : ionization, recombination
  - ◆  $\text{He}^{+2}$ : recombination
  - ◆  $\text{H}_2: \text{e} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{H} + \text{e}$ ,  $\text{He}^* + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{He} + \text{H}$
  - ◆  $\text{H}: \text{e} + \text{H} \rightleftharpoons \text{H}^* + \text{e}$ ,  $\text{e} + \text{H} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}$ ,  $\text{He}^{\text{meta}} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{He}^+$
- the pure He CR model (without H)
  - ◆ the main H and He reactions:  $\text{He}^{\text{meta}} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H} + \text{He}^+$
  - ◆ the population densities of meta-stables are far small compared to gs and the ions
  - ◆ the fractional content of H is small (RGA results)

# the Uncertainty Propagation Analysis

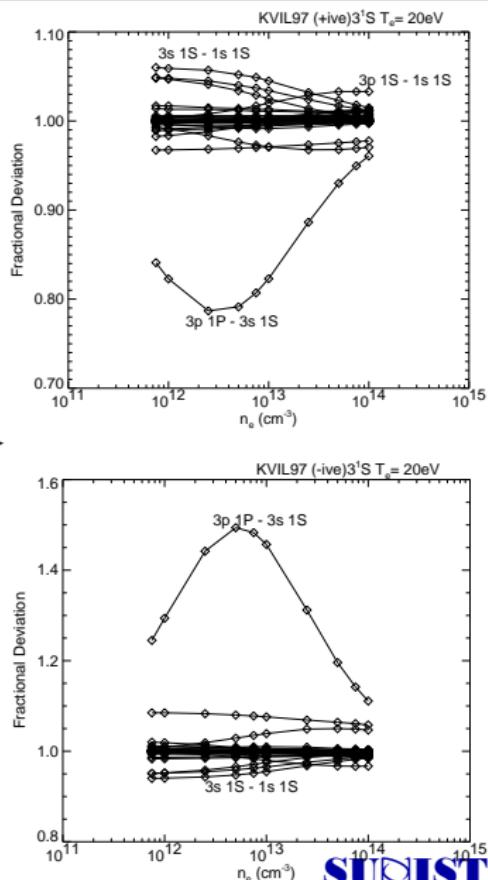
- Based on the analysis of  $n = 3$  states



Transition type	Error
Ground $\rightarrow$ singlets	$\pm 10\%$
Ground $\rightarrow$ triplets	$\pm 15\%$
Metastable $\rightarrow$ all	$\pm 20\%$
All other transitions	$\pm 50\%$

[N. Brenning J.Phys.D (1980)]

[Y Andrew PPCF (2000)] →



# deducing the Uncertainty Propagation Function of the uncertainties in the rate coefficients

$$N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i = N_e N_p \sum_{i \neq p} C_{pi} + N_p \sum_{i < p} A_{pi}$$

$$\sigma_{N_p} = \frac{dN_p}{N_p} = \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i) + \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{pi} + \sum_{i < p} A_{pi})$$

$$\sigma_{N_p} = \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{ip} N_i) + \sigma(N_e \sum_{i \neq p} C_{pi})$$

$$\simeq \frac{dF_{p,\text{in}}}{F_{p,\text{in}}} + \frac{dF_{p,\text{out}}}{F_{p,\text{out}}}$$

$$\sigma_{N_p} \simeq 2 \left( \frac{dF_{p,\text{in}}}{F_{p,\text{in}}} \right) \simeq 2 \left( \frac{dF_{p,\text{out}}}{F_{p,\text{out}}} \right)$$

$$\boxed{\sigma_{N_p} = E_{jp}\sigma(C_{jp}) = 2 \left( 1 - \frac{2}{F_{j,\text{in}}} \right)^{-1} \frac{f_{jp}}{F_{p,\text{in}}} \sigma(C_{jp})}$$

$$\sigma(N_j) \simeq 2 \left( \frac{dF_{j,\text{out}}}{F_{j,\text{out}}} \right) \simeq 2 \left( \frac{df_{jp}}{F_{j,\text{in}}} \right)$$

$$\begin{aligned} dF_{p,\text{in}} &= df_{jp} = d(N_e N_j C_{jp}) \\ &= N_e C_{jp} N_j \frac{dC_{jp}}{C_{jp}} + N_e C_{jp} N_j \frac{dN_j}{N_j} \\ &= f_{jp} \sigma(C_{jp}) + f_{jp} \sigma(N_j) \end{aligned}$$

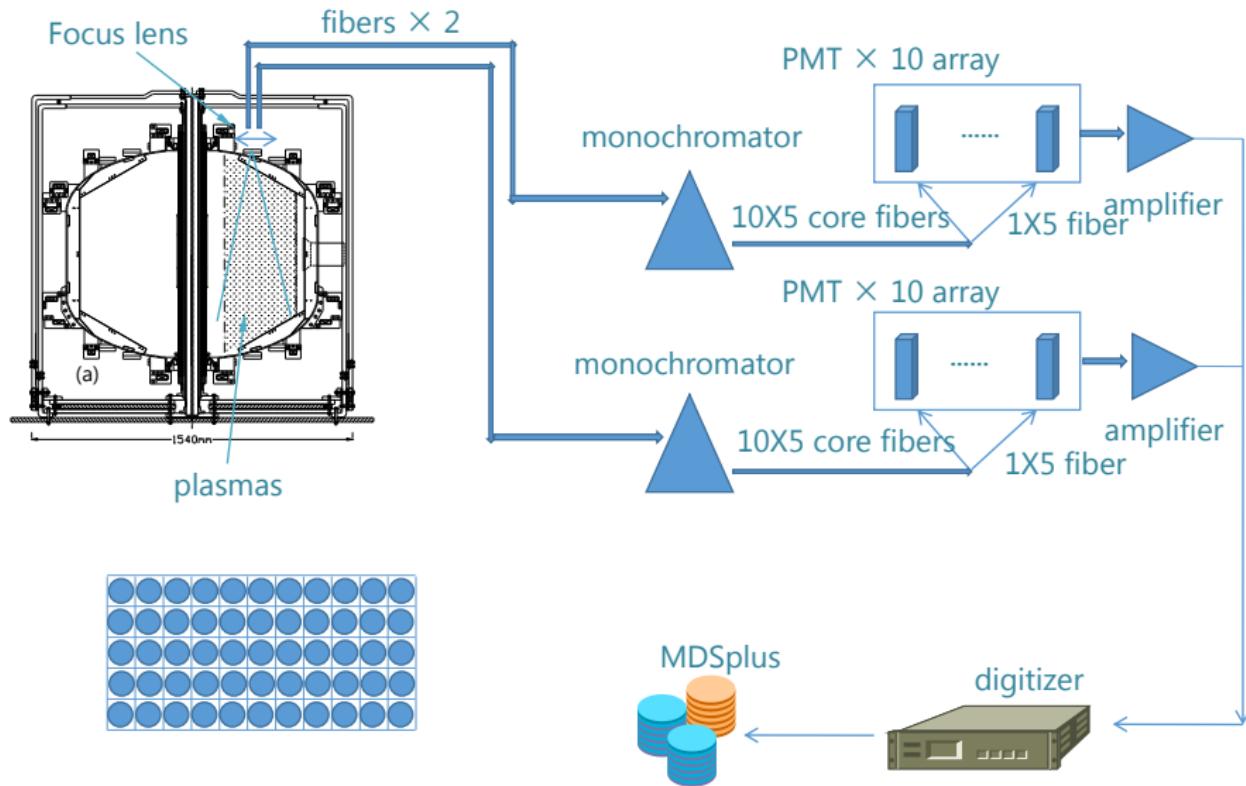
$$df_{jp} = f_{jp} \sigma(C_{jp}) + 2 f_{jp} \left( \frac{df_{jp}}{F_{j,\text{in}}} \right)$$

$$df_{1p} = N_e C_{1p} dN_1 \simeq N_e C_{1p} N_1 \frac{dN_1}{N_1} = f_{1p} \sigma(N_1)$$

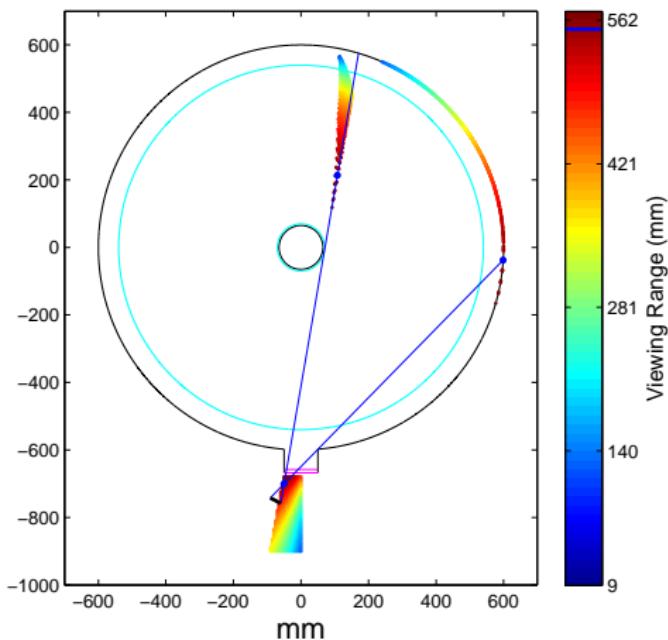
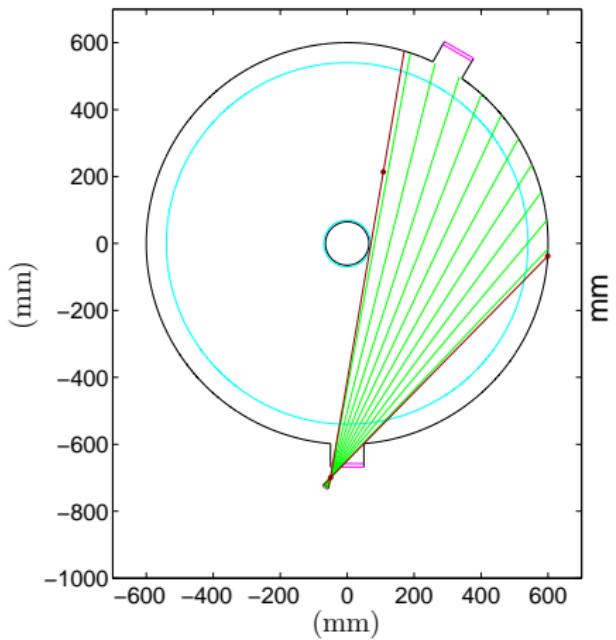
$$\boxed{\sigma_{N_p} = 2 \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} \sigma(N_1) = 2 \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} E_{j1} \sigma(C_{j1}) \\ = E_{j1p} \sigma(C_{j1})}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{N_p} &= 2^2 \cdot \frac{f_{1p}}{F_{p,\text{in}}} \cdot \frac{f_{\text{He}^{+1}}}{F_{1,\text{in}}} \cdot E_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}} \sigma(C_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}}) \\ &= E_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}1p} \sigma(C_{\text{He}^{2+}\text{He}^{+}}) \end{aligned}$$

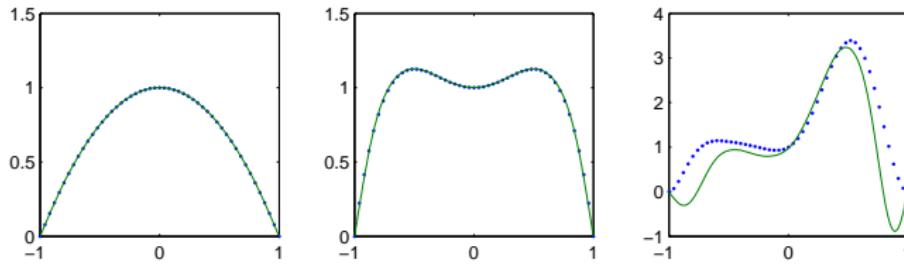
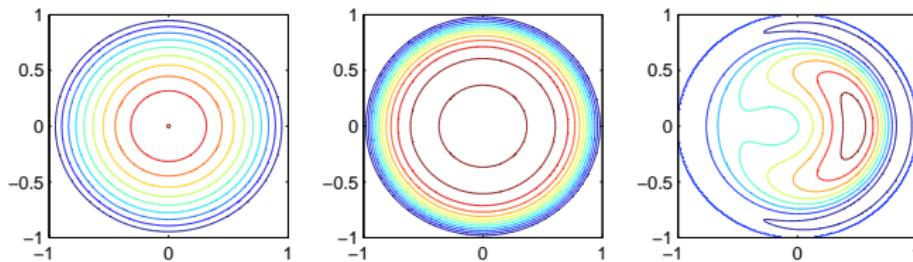
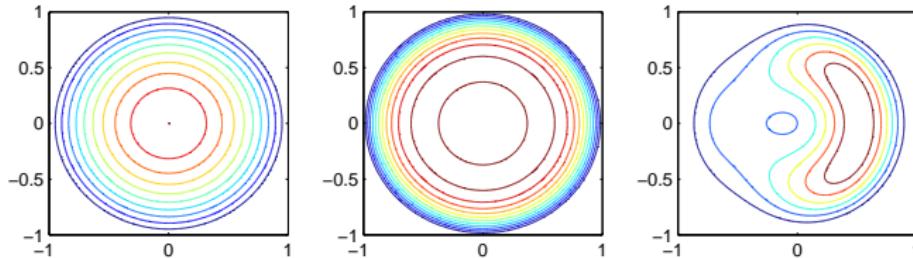
# tomography measurements and the future plan (1)



# tomography measurements and the future plan (2)

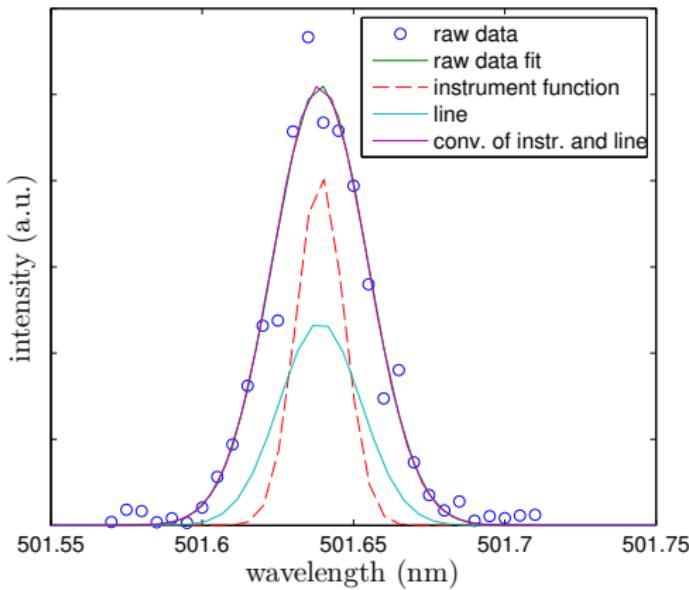


# tomography measurements and the future plan (3)



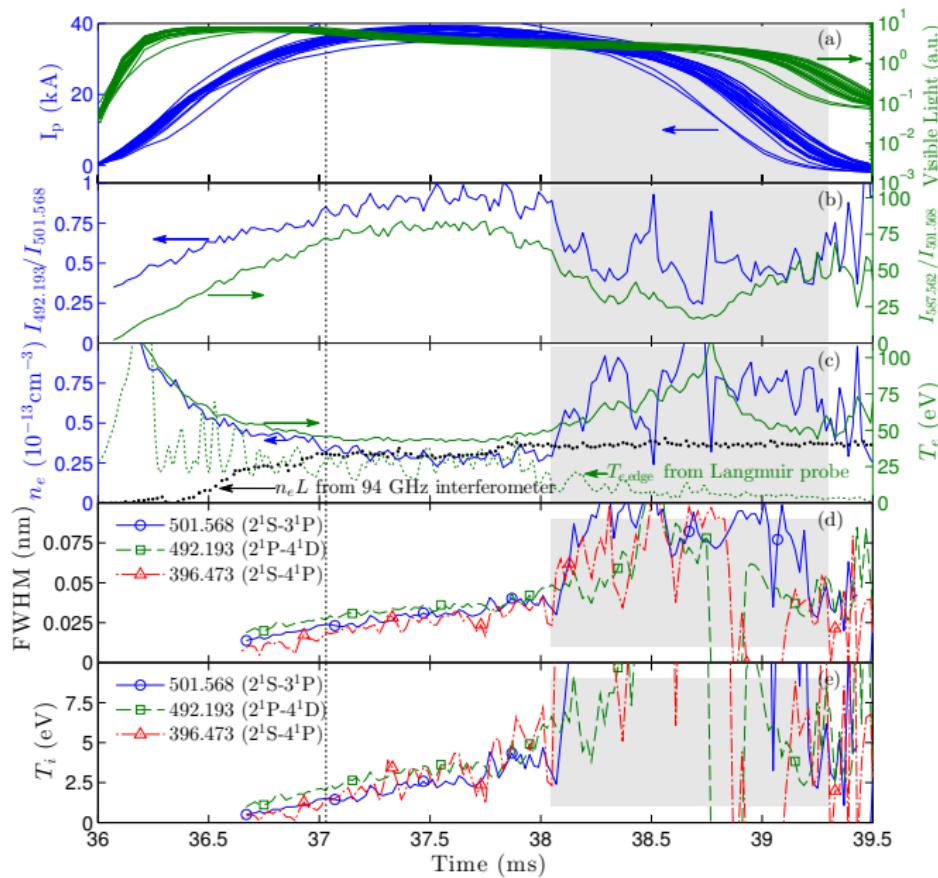
# the Line shape analysis and $T_i$ diagnostics (1)

- FWHM estimation of the lines (right)
- Monochromator: resolution 0.2 Å
- For He 501.568 nm:

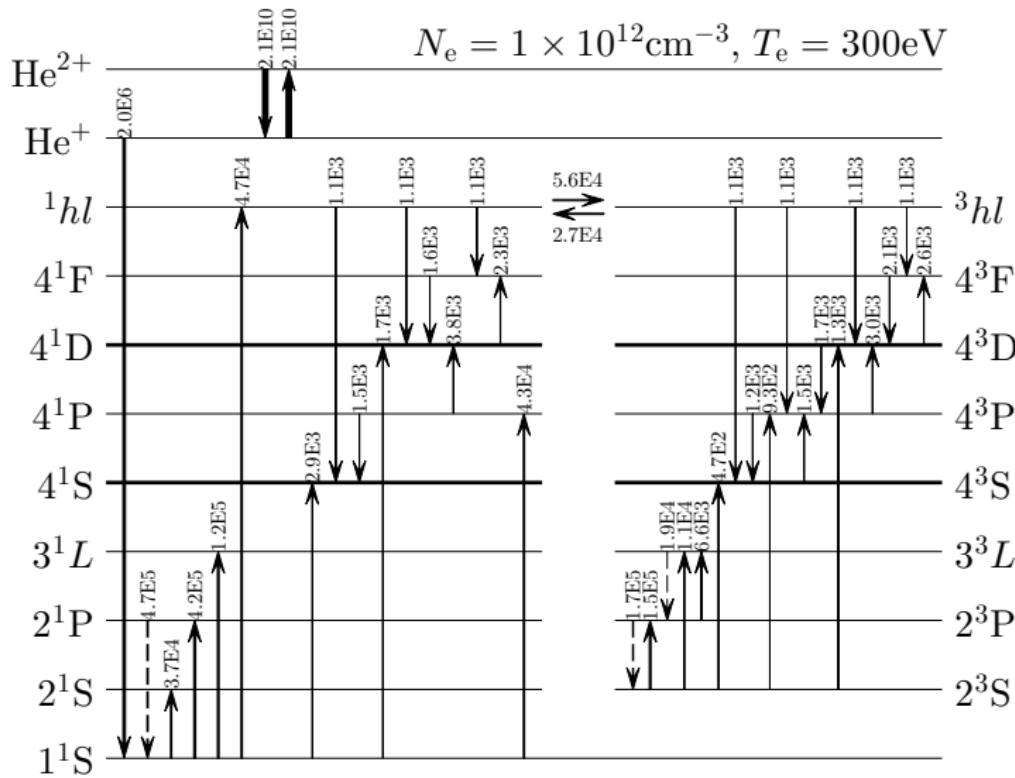


gas	$n_e$ (/m <sup>3</sup> )	$T_e$ (eV)	$T_i$ (eV)	$V_i$ (km/s)	$B_t$ (T)
H <sub>2</sub>	5.0E+18	100	20	5	0.15
He	5.0E+18	100	20	3	0.15
<hr/>					
谱线	$\Delta\lambda_D$	$\delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_S$	$\Delta\lambda_Z$	
H <sub>α</sub>	2.25	0.11	0.01	0.03	
H <sub>β</sub>	1.67	0.08	0.06	0.02	
H <sub>γ</sub>	1.49	0.07	0.07	0.01	
H <sub>δ</sub>	1.41	0.07	0.13	0.01	
H <sub>7-2</sub>	1.36	0.07	0.20	0.01	
H <sub>8-2</sub>	1.34	0.06	0.25	0.01	
H <sub>∞-2</sub>	1.26	0.06	-	0.01	
He 388.9	1.34	0.04	0.01	0.01	
He 501.6	1.72	0.05	0.02	0.02	
He 587.6	2.02	0.06	0.01	0.02	
He 667.8	2.29	0.07	0.02	0.03	
He 706.5	2.43	0.07	0.02	0.03	
He 728.1	2.50	0.07	0.03	0.04	

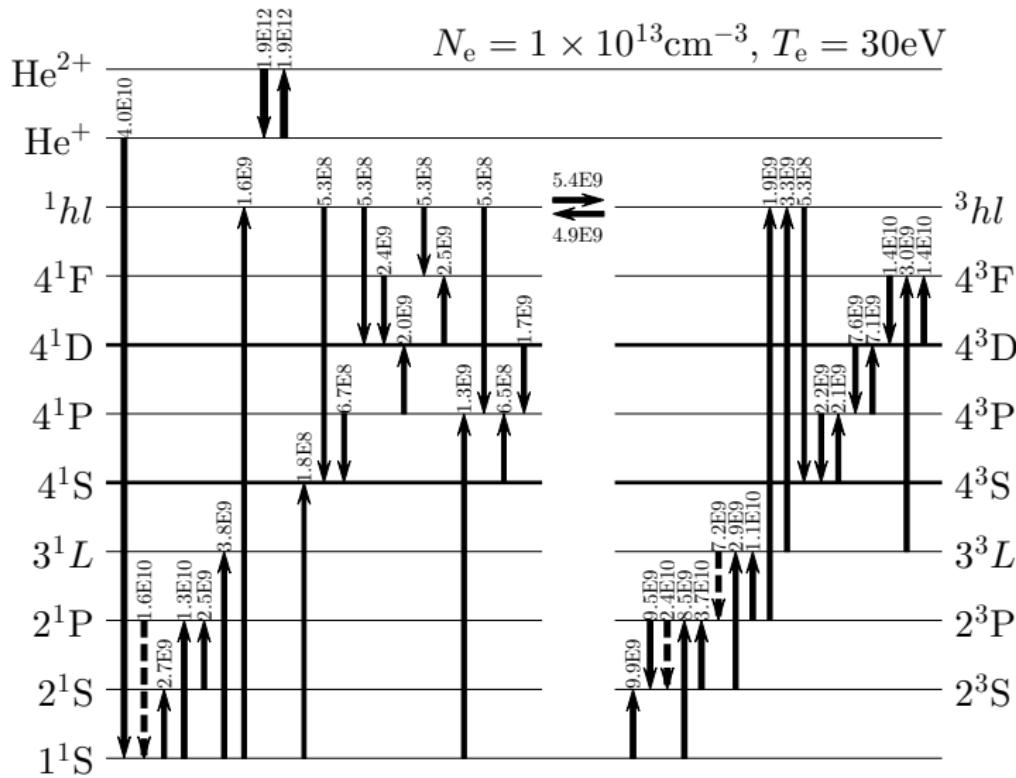
# the Line shape analysis and $T_i$ diagnostics (2)



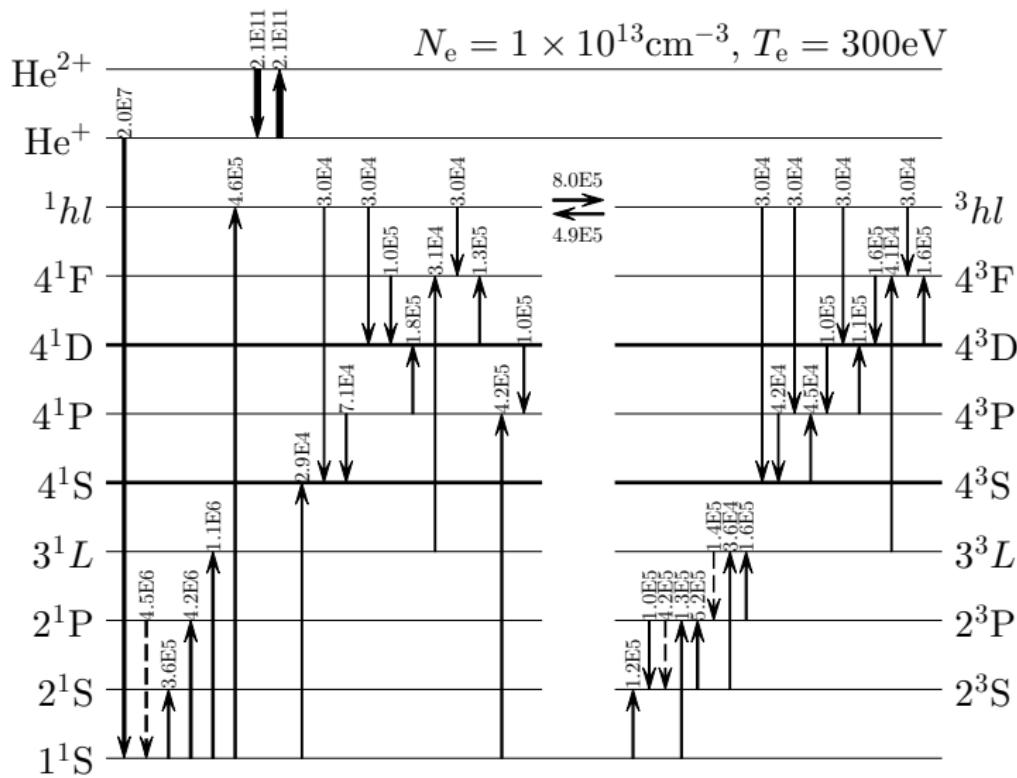
# 速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



# 速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



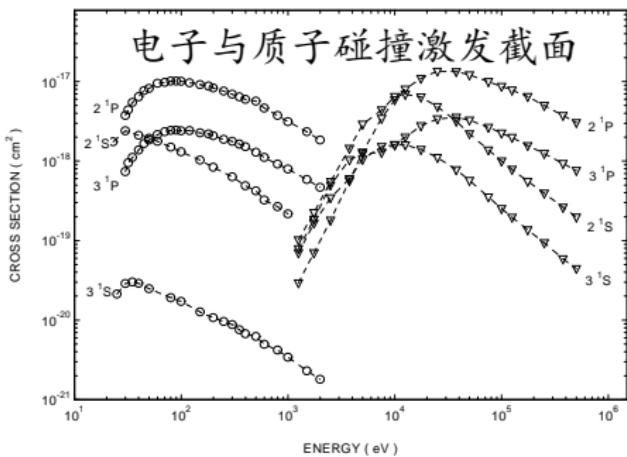
# 速率系数不确定性：各能级的主要产生过程



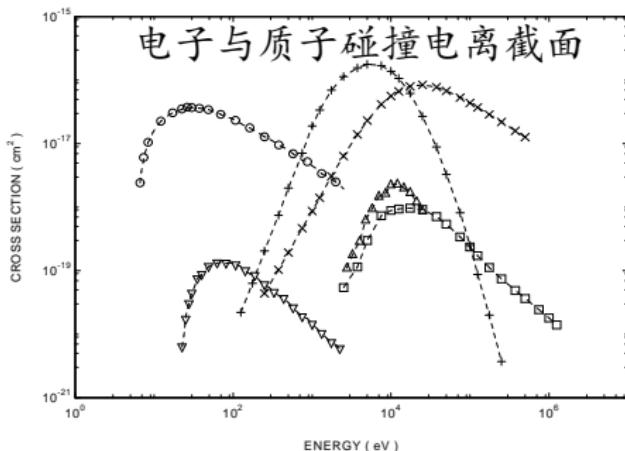
# 忽略氢与其他杂质的影响：含量低、截面小

- 杂质粒子中氢的含量最高

- ◆ 本底质谱：等效  $H \sim 40\% @ 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  | 氦放电气压  $4.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
- ◆ 电子与质子碰撞激发与电离截面的对比：



[Anderson H PhD Thesis (1999) ]



- 其他 C、N、O 等杂质含量不会高于 H [RC Isler NF (1984) ]

# 碰撞辐射模型中考虑的主要粒子、反应过程

## ■ 考虑的粒子

- ◆  $e$ 、 $\text{He}(n^{2S+1}L)$ 、 $\text{He}^+$ 、 $\text{He}^{2+}$

## ■ 考虑的反应过程

- ◆ 电子碰撞激发/退激发
- ◆ 电子碰撞电离/复合
- ◆ 自发辐射跃迁