塵粒子に作用する
輻射トルクの定量的評価

松村雅文（香川大学教育学部）

昨年の GFW/GD研究会での課題

- **“定説”？の整列機構**：
  - **常磁性緩和**による整列（Davis & Greenstein, 1951)
  - 輻射トルク説（Draine & Weingartner 1996, Lazarian など）
  - 昨年の報告： 偏光効率（p_λ/A_λ）とダスト温度との相関
    - 温度が低いと、短波長で偏光効率が悪い → 小さい塵は整列しない

Matsumura et al. 2011, PASJ 63 L43

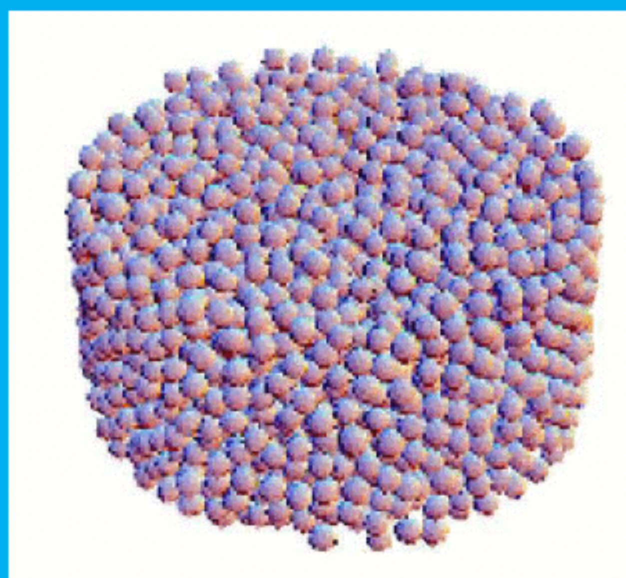
- モデルを作りたい： DDA法？
- 昨年の研究会
  - 木村 宏さんから複数の球の散乱計算手法（Mieの拡張版）があることを教えてもらった。
  - 「小さい粒子ほど、RATの効率は低い」は 本当か？

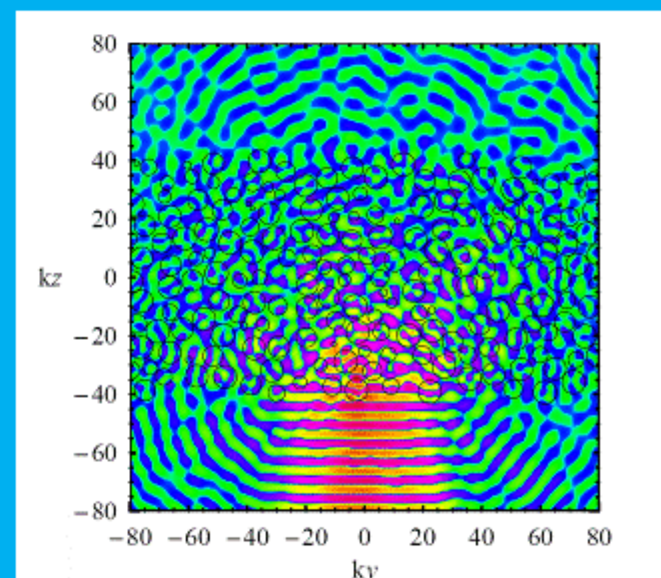
（山本さんの質問）

MSTM by D. Mackowski

MSTM

The Multiple Sphere *T* Matrix Fortran-90 Code





- http://eng.auburn.edu/users/dmckwski/scatcodes/

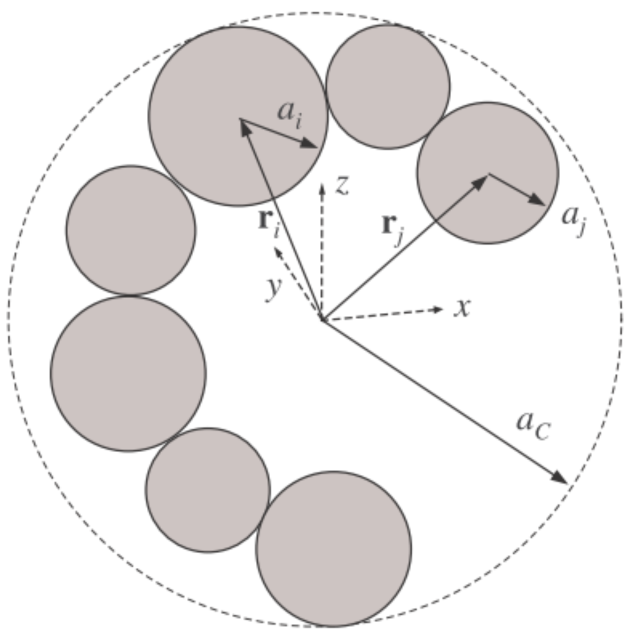


Figure 1: Ensemble configuration

- 重なっていない球の集合体(接していてもよい)
- Vector Spherical Wave Function で展開
  → 塵表面での境界条件 → 座標変換
- Near field も計算できる
  - ･･･ 輻射トルクは、高次の項 （1／r^3 等）が利く

輻射トルク：とりあえず…

- 半径aの球状塵粒子が1秒間に受け取るエネルギー（フラックス）： $E \sim \pi a^2 u c q$

  u [erg/cm^3]: 輻射エネルギー密度

  c: 光速　q: “仮の”効率
- 運動量： $p = E/c \sim \pi a^2 u q$
- 輻射トルク： $\Gamma \sim a' p \sim \pi a^2 a' u q$

  – 但し、a’： 運動量を受け取る場所 と 重心との距離

    - Cf. 慣性モーメント $I \sim 2/5\ ma^2$

      従って、角加速度 $d\omega/dt = \Gamma / I \sim a' u q / m$

円偏光による輻射トルク(1)

- 1個の光子： スピンを持つ
  - エネルギー：$\hbar\omega$ → 対応する角運動量 $\hbar$
- 完全円偏光を仮定
  - エネルギー密度 u [erg/cm^3]
  - → 角運動量密度 $u/\omega = u \cdot \lambda / 2\pi c = u / kc$
- 輻射トルク効率 Q_Γの（通常の）定義：

$\Gamma = \pi a_v^2$ ・角運動量フラックス・Q_Γ

$= \pi a_v^2\, u\, Q_\Gamma \,/\, k$

$= \pi a_v^2\, u\, a_v\, (Q_\Gamma / x_v)$

$x_v = k a_v$ 無次元サイズパラメータ

a_v 同じ体積を与える球の半径

円偏光による輻射トルク(2)

- Marston & Crichton (1984)
  - 球の場合、 $Q_{\Gamma} = Q_{abs}$
  - 「円偏光の光子が吸収されると、光子が持つトルクは、塵粒子に移動する」 と直感的に理解可能
- 古典電磁気学的には？

→ MSTM法を用いて、塵の内外の電場Eなどを求めて、考えてみた。

- Maxwellのストレステンソルを、立体角について数値積分し、トルクを計算した。

Mishchenko et al (2002)

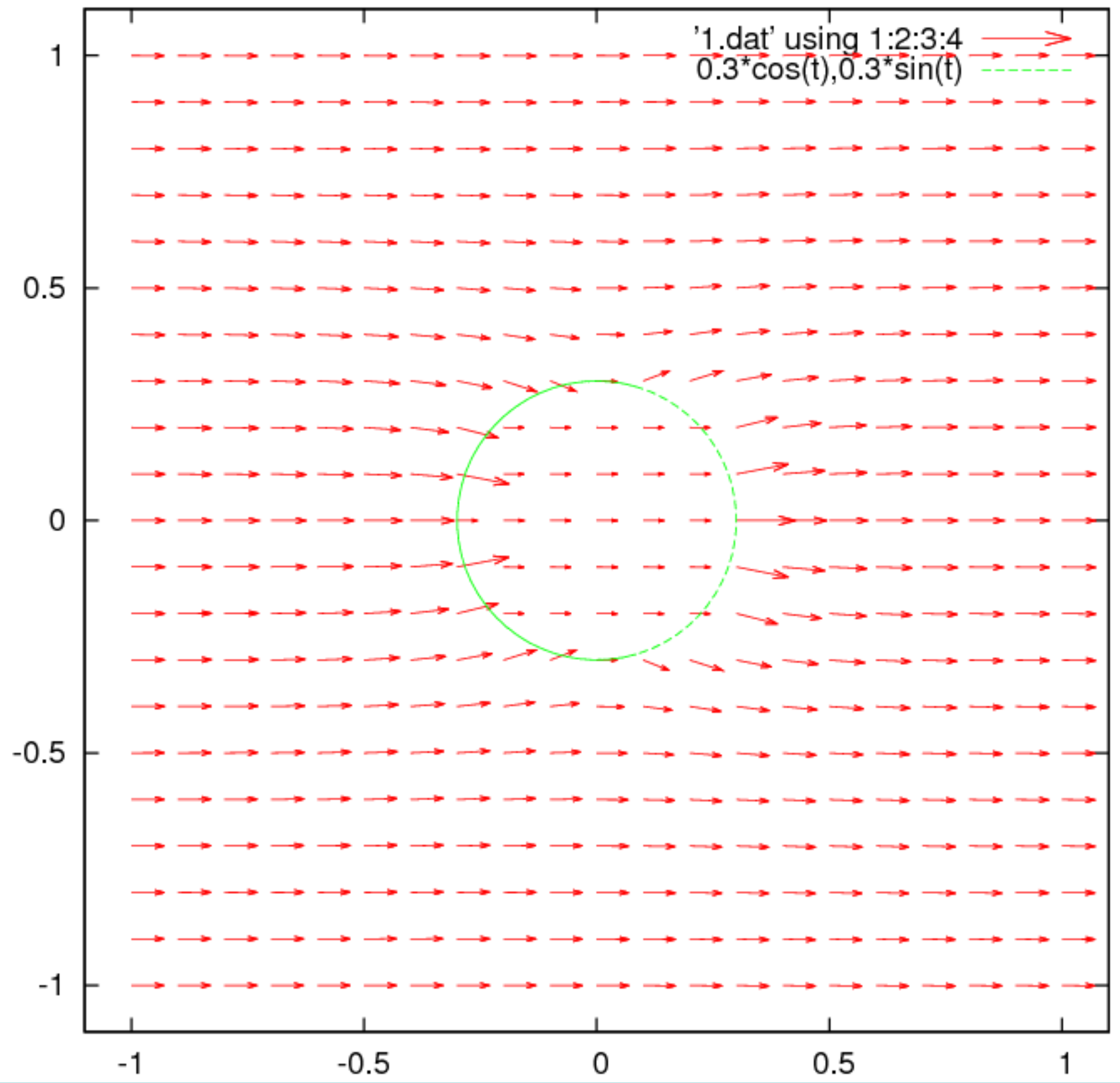
x=0.3

m=1.7+0i

紙面から円偏光(右ねじ)が入射

電場ベクトルのスナップショット

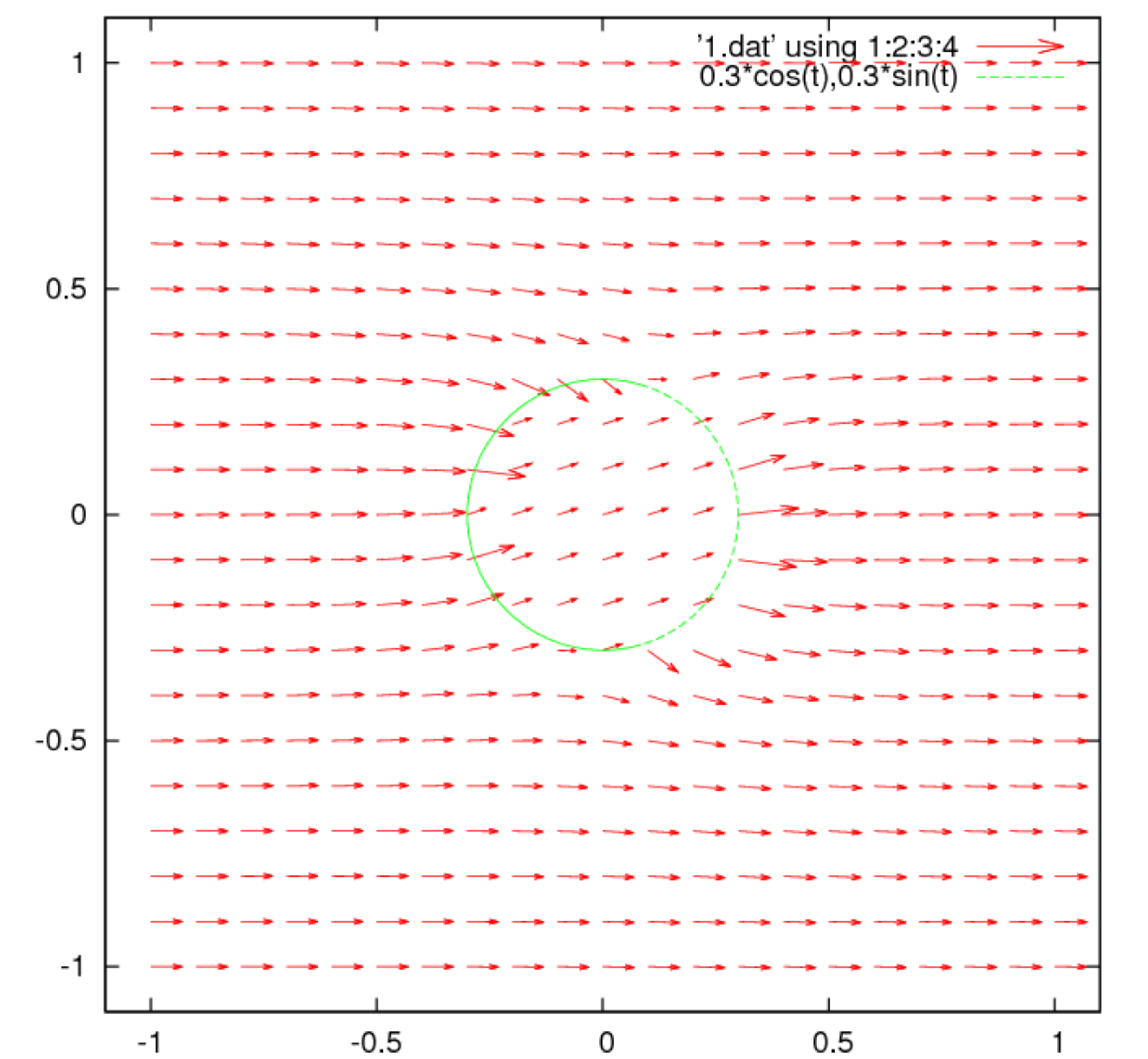
＠ z=0



x=0.3

m=

1.7+0.05i



x=0.3

m=1.7+0.1i

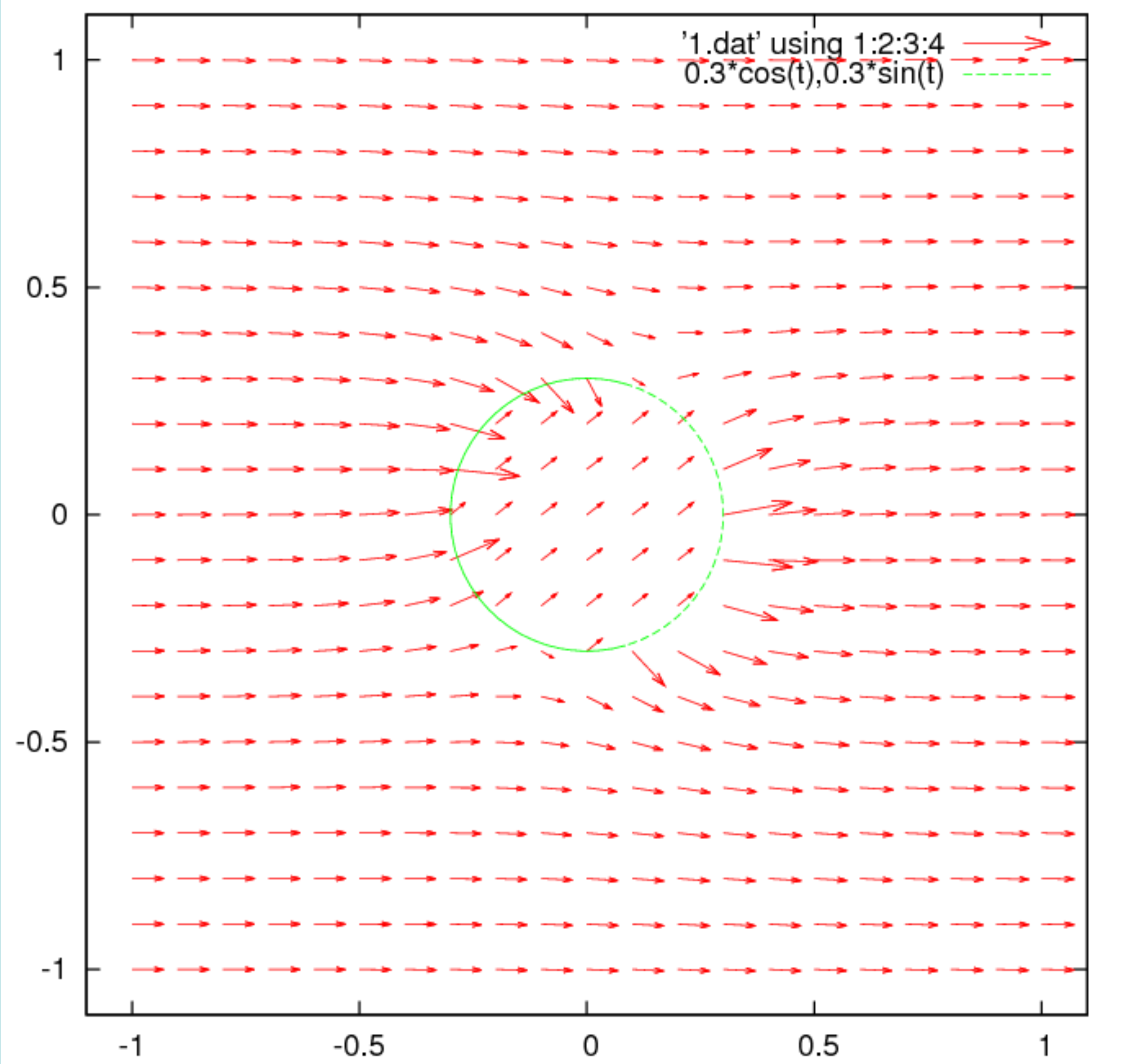
解釈:

屈折率に虚数部

→分極に時間的な遅れ

→クーロン力

→トルク

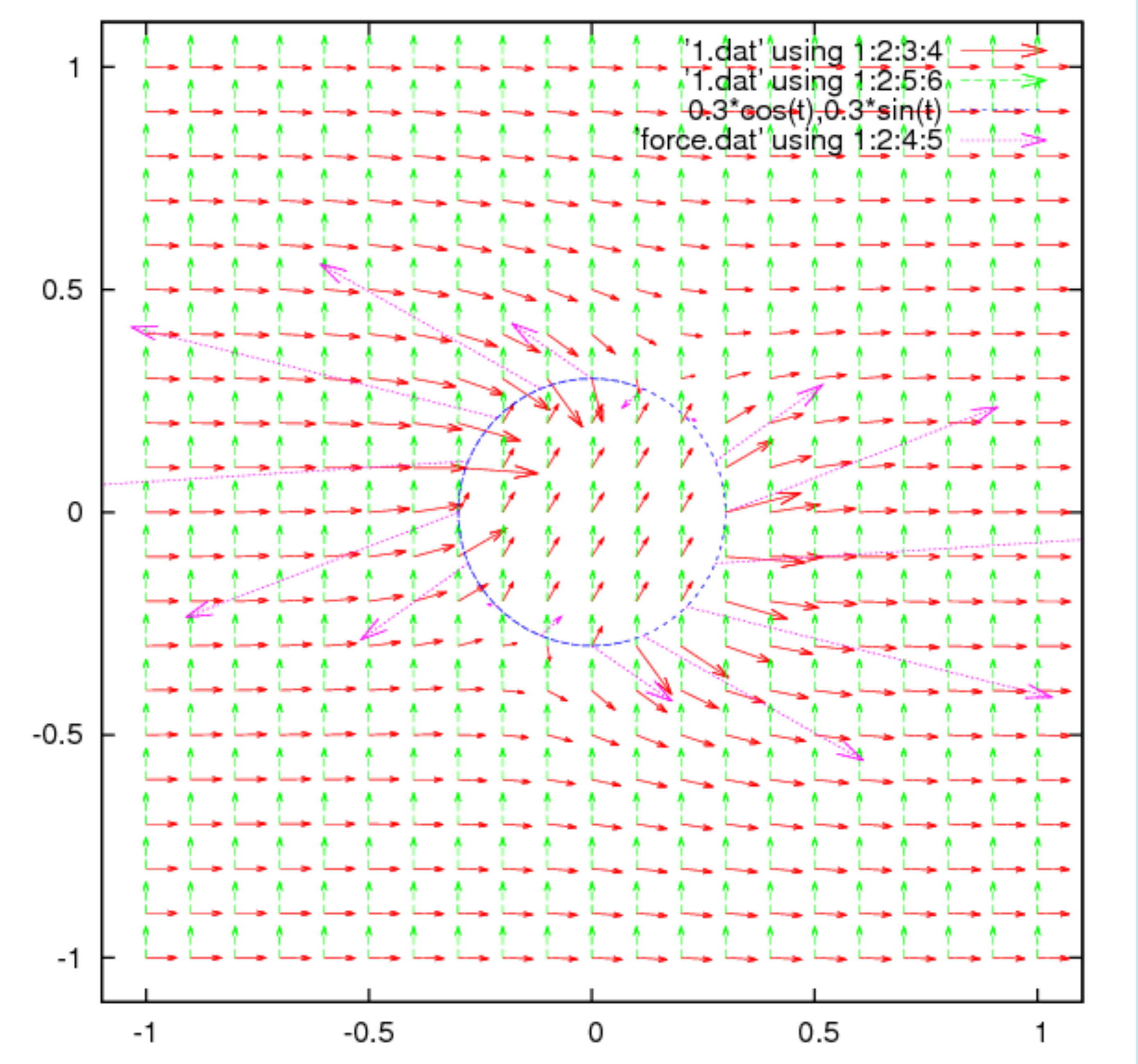


x=0.3

m=

1.414+

1.414i

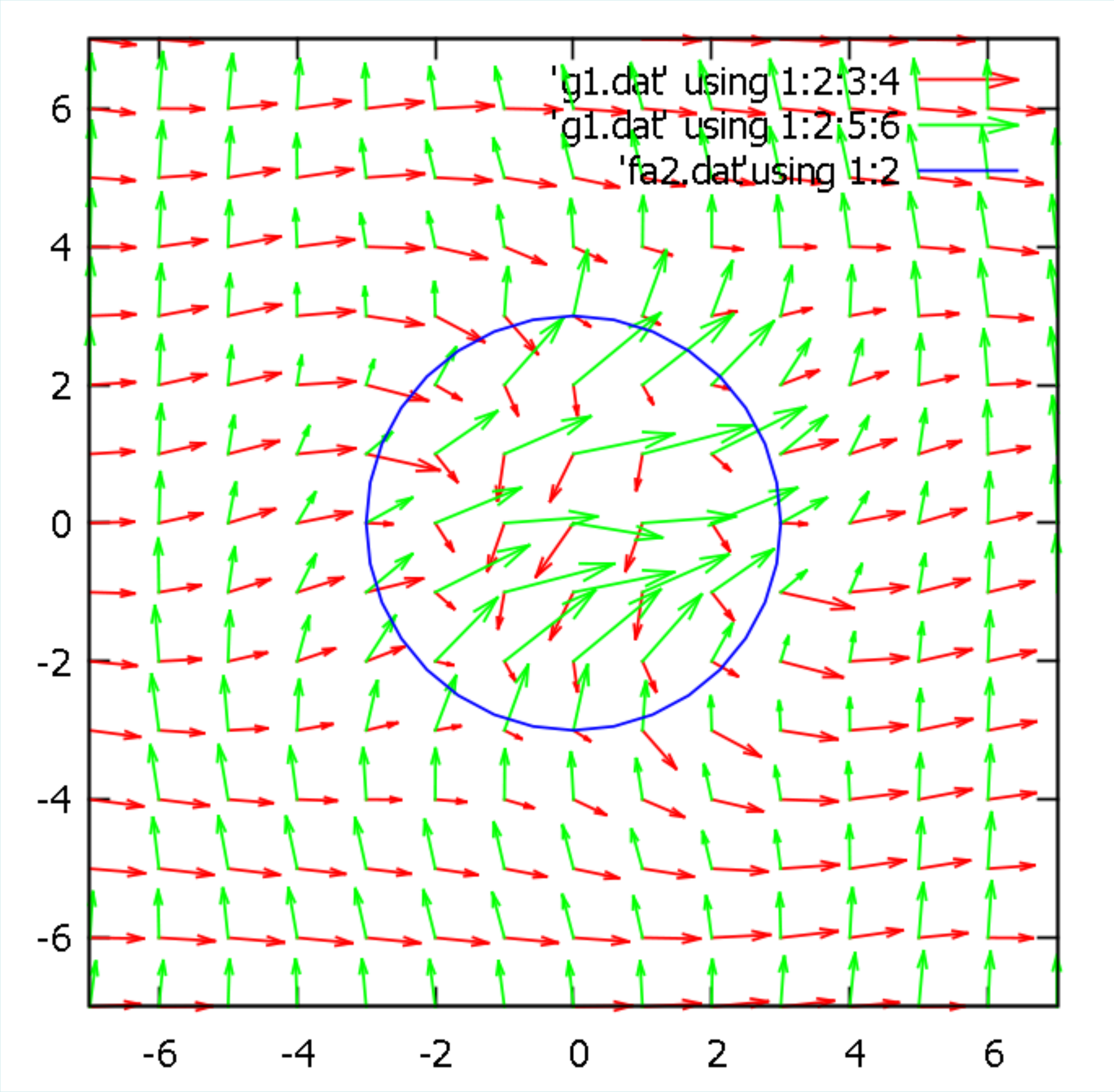


電場：赤

磁場：緑

力：紫

- x = 3.0
- m=1.7＋0i



電場:赤

磁場:緑

円偏光による輻射トルク(3)　計算

- 計算:

$$\boldsymbol{\Gamma} = -\int_S \mathrm{d}S\, r\,\hat{\mathbf{r}}\cdot[\langle \overleftrightarrow{T}_{\mathrm{M}}(\mathbf{r})\rangle \times \hat{\mathbf{r}}]$$
$$= -r^3 \int_{4\pi} \mathrm{d}\hat{\mathbf{r}}\,\hat{\mathbf{r}}\cdot[\langle \overleftrightarrow{T}_{\mathrm{M}}(\mathbf{r})\rangle \times \hat{\mathbf{r}}]$$

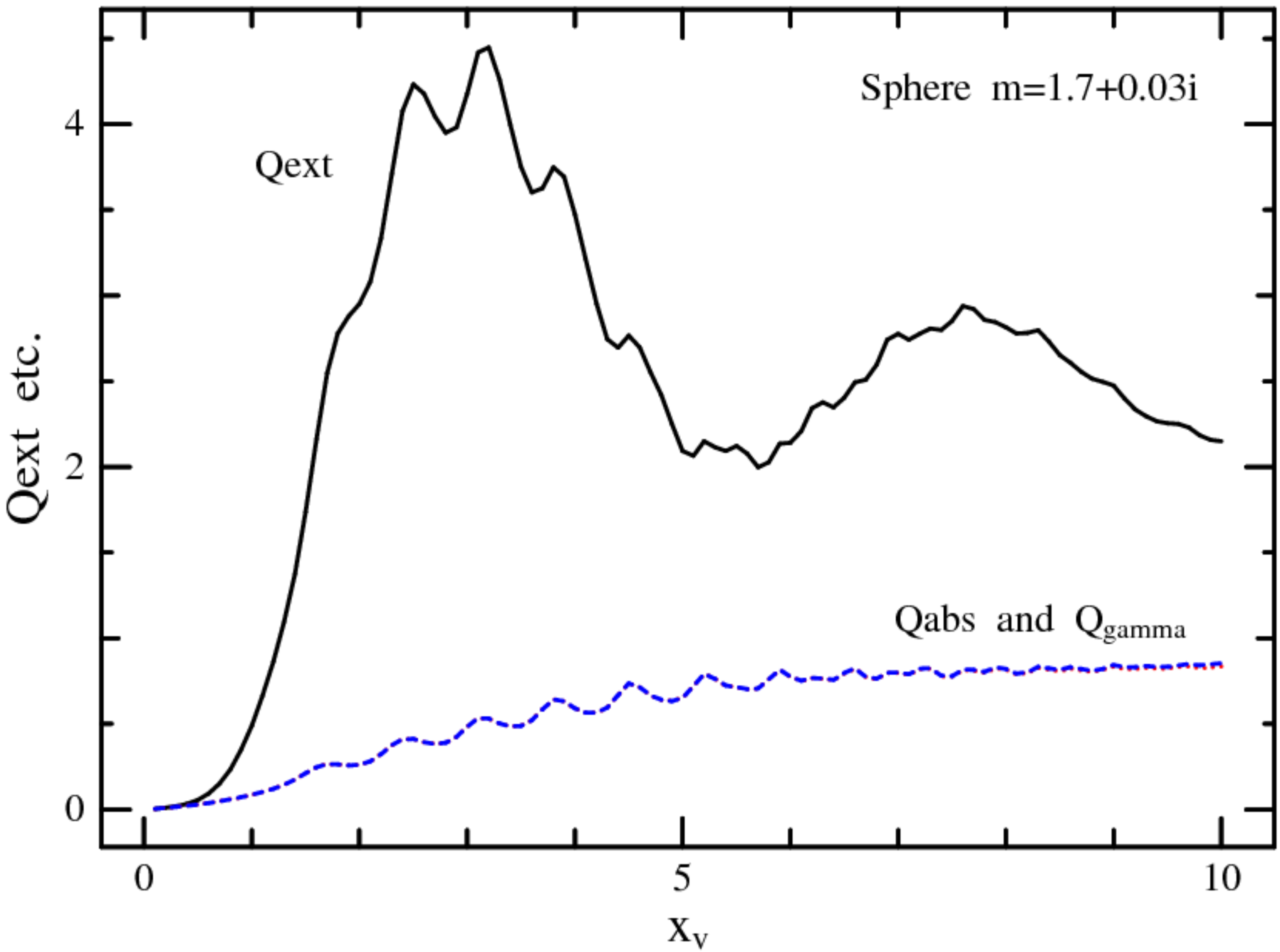
MSTMでnear field が得られる。→計算可能

ここで、T_M: the Maxwell stress tensor:

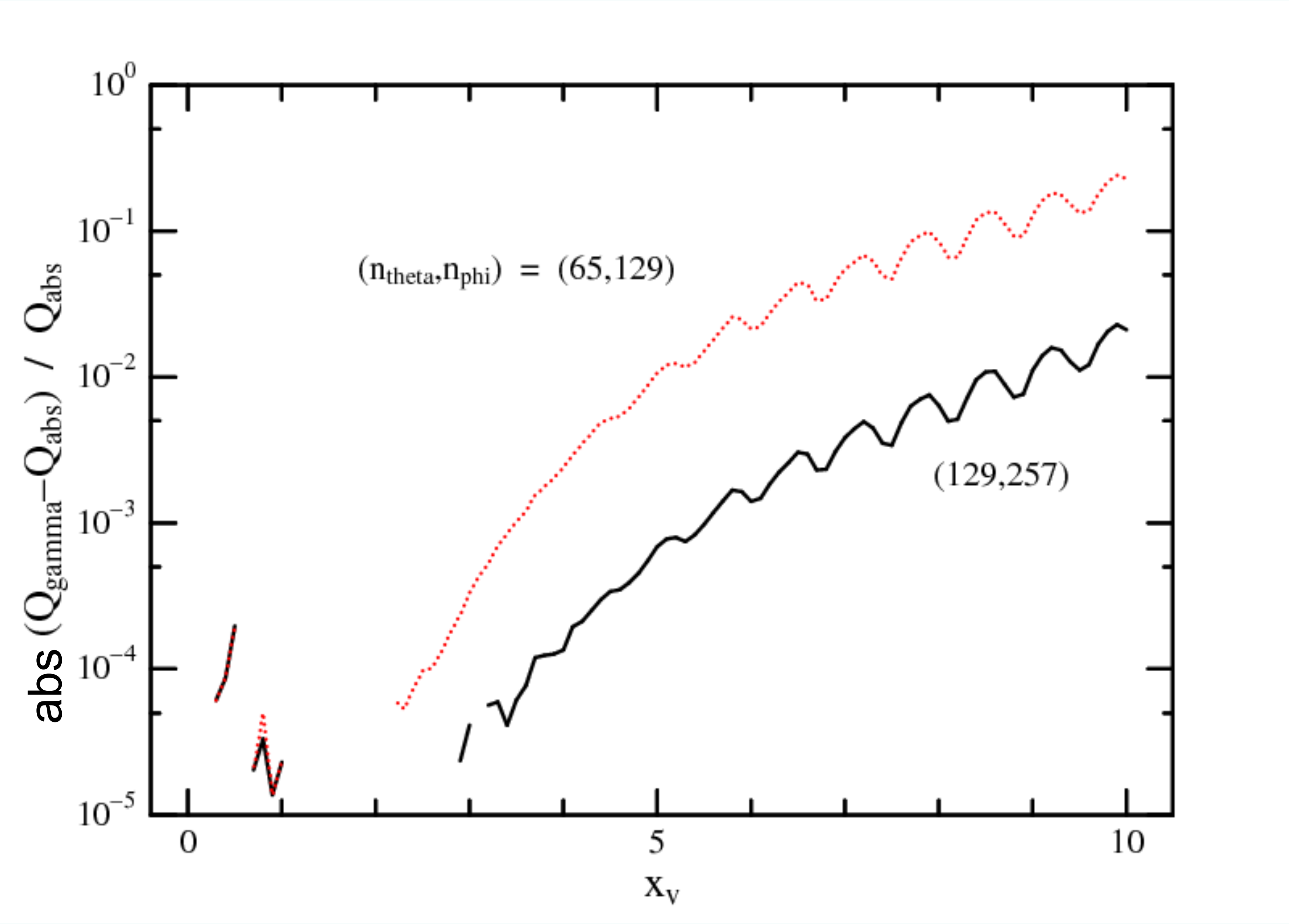
$$\overleftrightarrow{T}_{\mathrm{M}} = \varepsilon_0[\mathbf{E}\otimes\mathbf{E} + c^2\mathbf{B}\otimes\mathbf{B} - \tfrac{1}{2}(\mathbf{E}\cdot\mathbf{E} + c^2\mathbf{B}\cdot\mathbf{B})\overleftrightarrow{I}]$$
$$= \varepsilon_0\mathbf{E}\otimes\mathbf{E} + \mu_0\mathbf{H}\otimes\mathbf{H} - \tfrac{1}{2}(\varepsilon_0\mathbf{E}\cdot\mathbf{E} + \mu_0\mathbf{H}\cdot\mathbf{H})\overleftrightarrow{I},$$

Mishchenko et al (2002)

- 解析的な表現もある:
  – Farsund & Felderhof (1996)
  – Borghege et al. (2006)



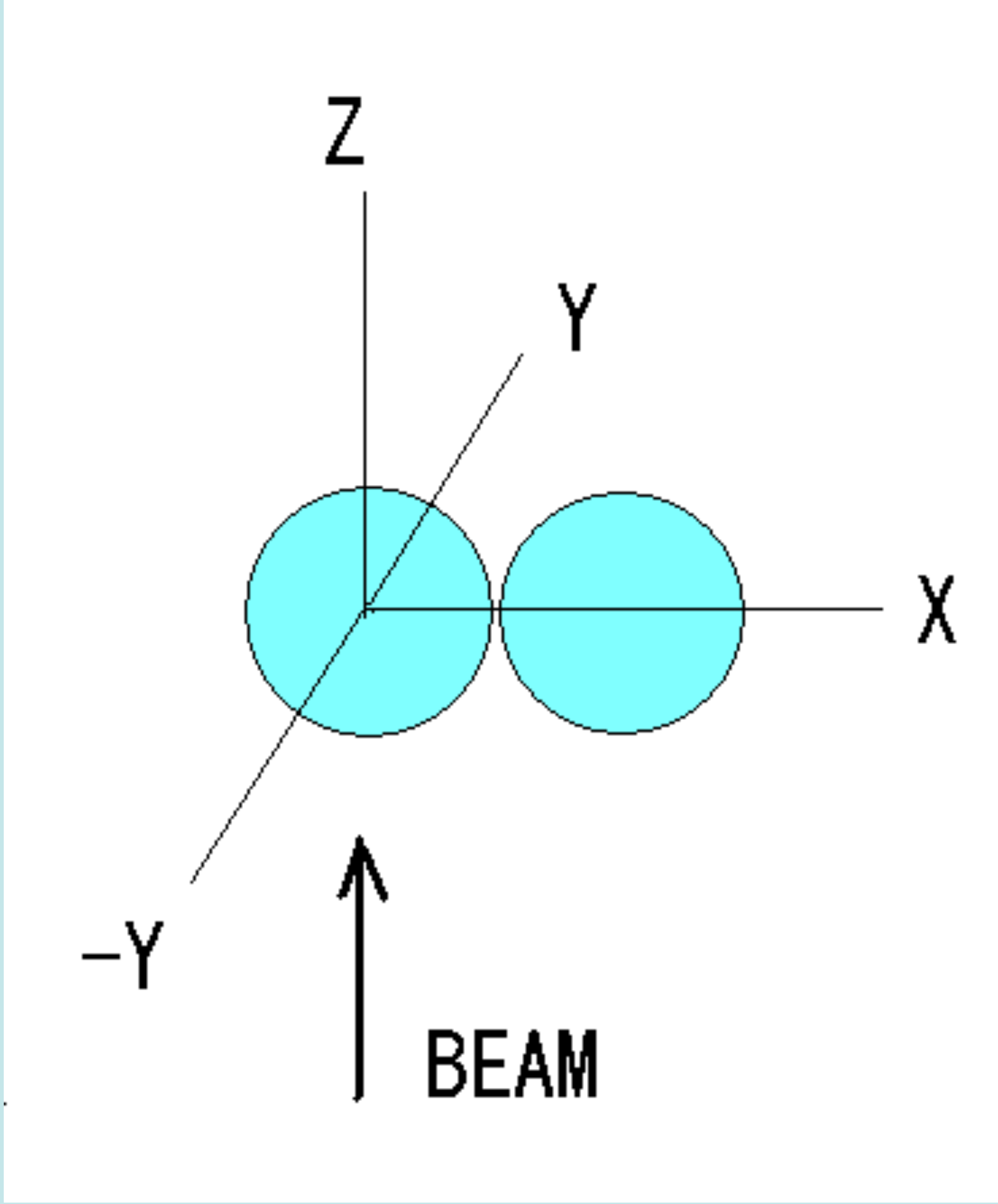
Sphere m=1.7+0.03i
Qext
Qabs and Q_{gamma}
Qext etc.
X_V
0
2
4
0
5
10

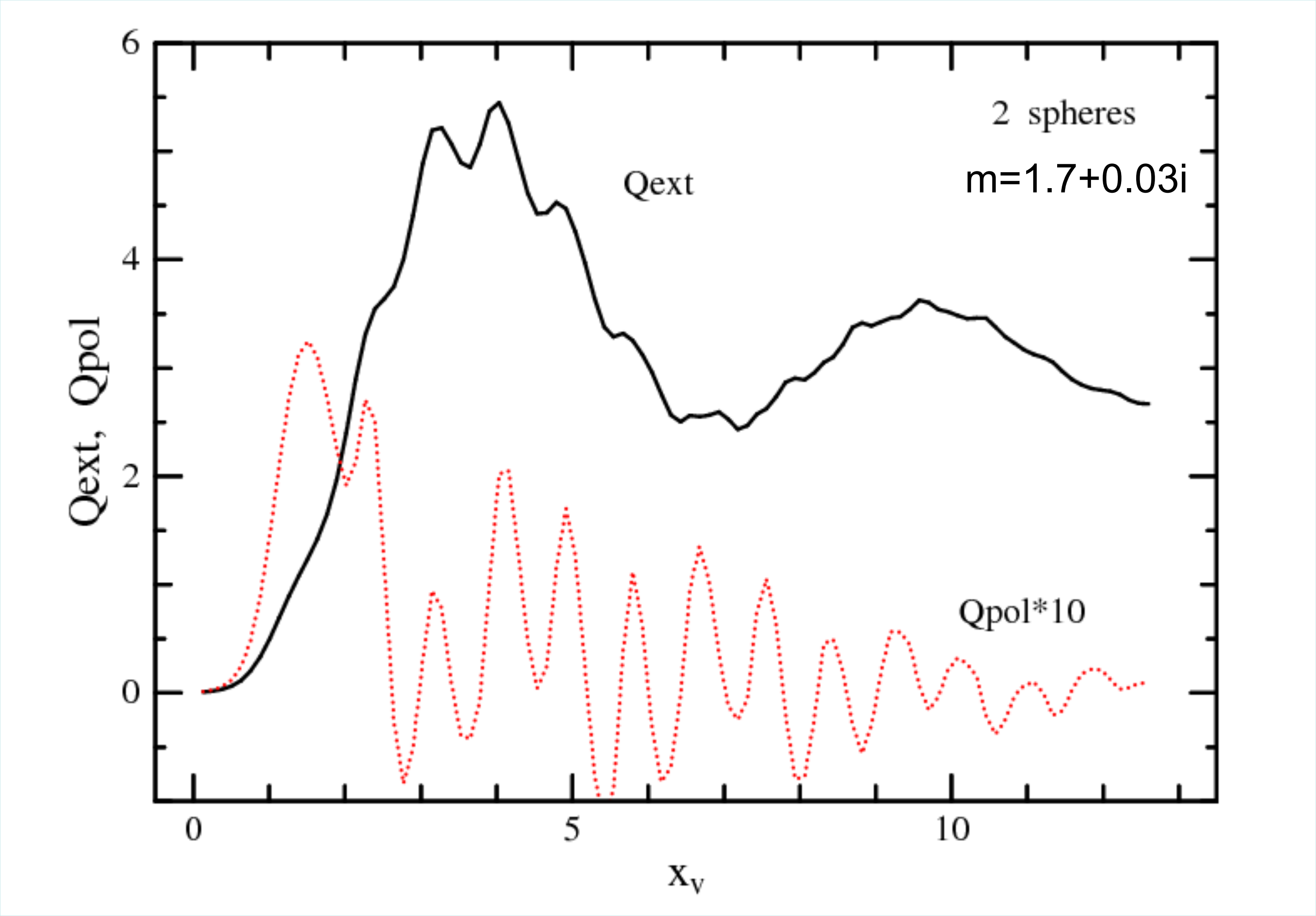


- Q_ΓとQ_{abs} の相対的な差（=数値積分の誤差）

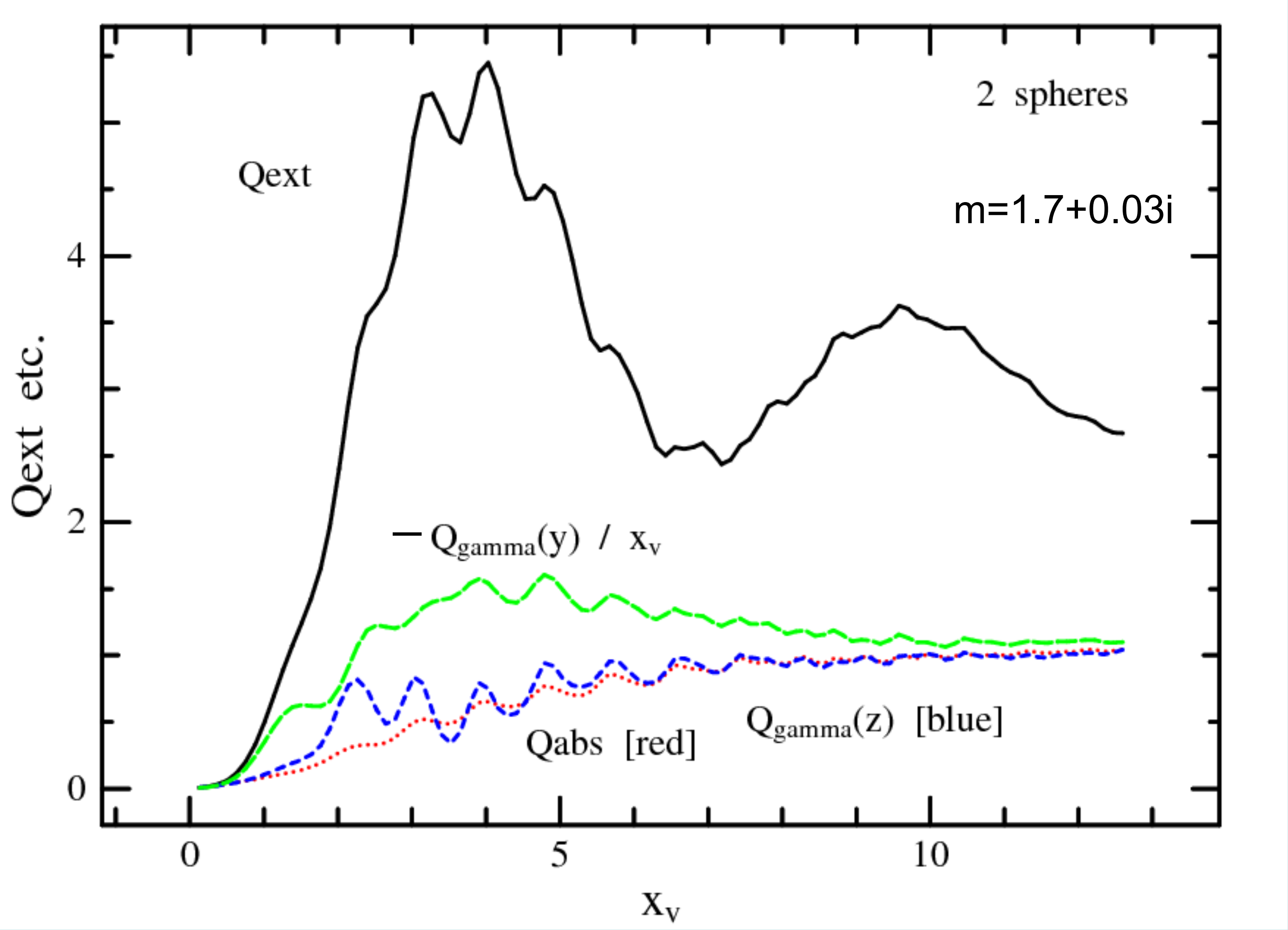
2球のモデル

- 重心は、一つの球の中心と仮定
- 入射光:
  - -zから +z へ
  - “右ねじ”の円偏光
- Z軸周りのトルク :円偏光による
- Y軸周りのトルク :形状による



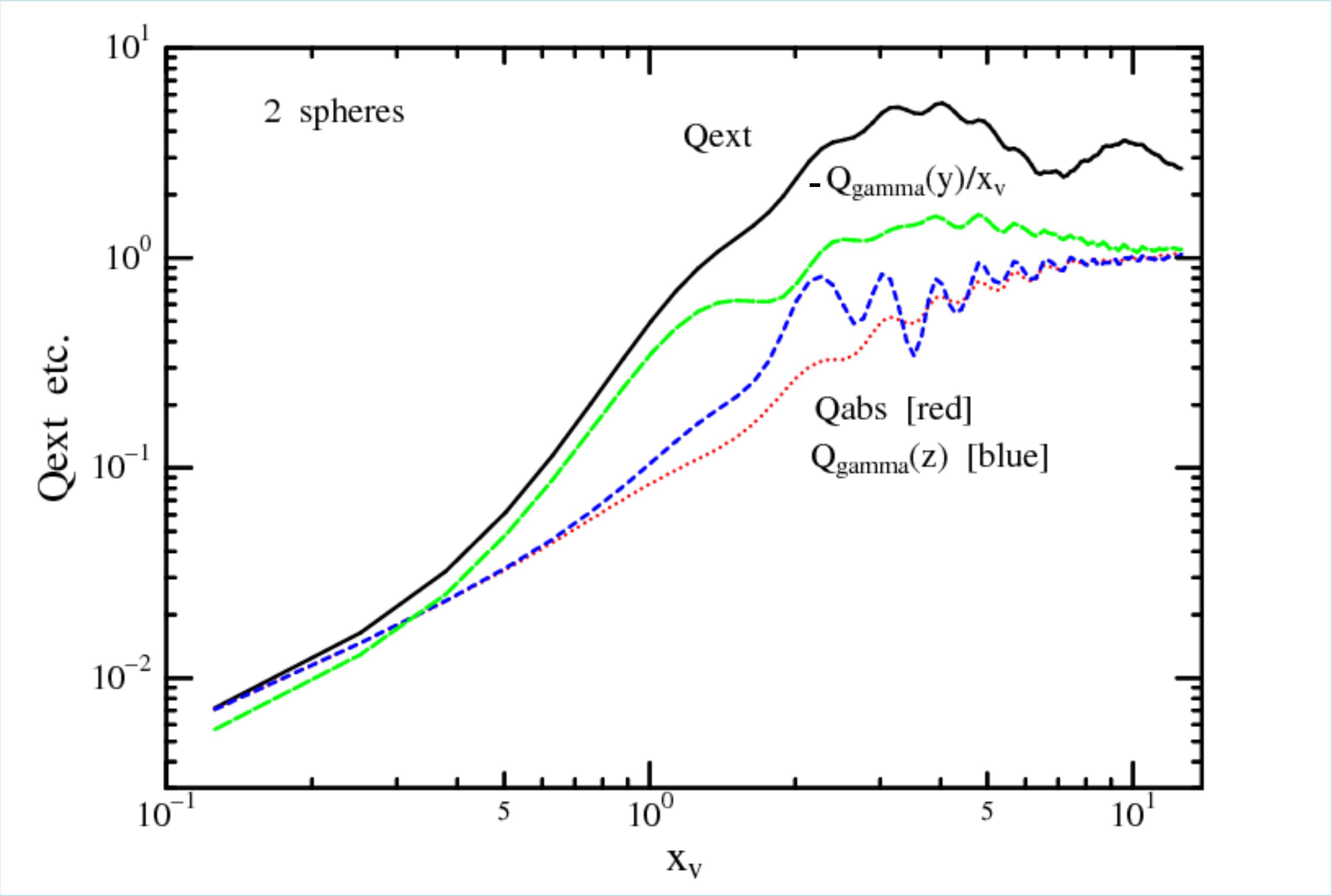


Q_{ext} と Q_{pol}



$$\Gamma = \pi a_v^2 \, u \, Q_\Gamma \,/\, k$$

$$= \pi a_v^2 \, u \, a_v \, (Q_\Gamma / x_v)$$



2 spheres
Qext
- Qgamma(y)/xv
Qabs [red]
Qgamma(z) [blue]
Qext etc.
xv

輻射トルク vs. ガスによる摩擦

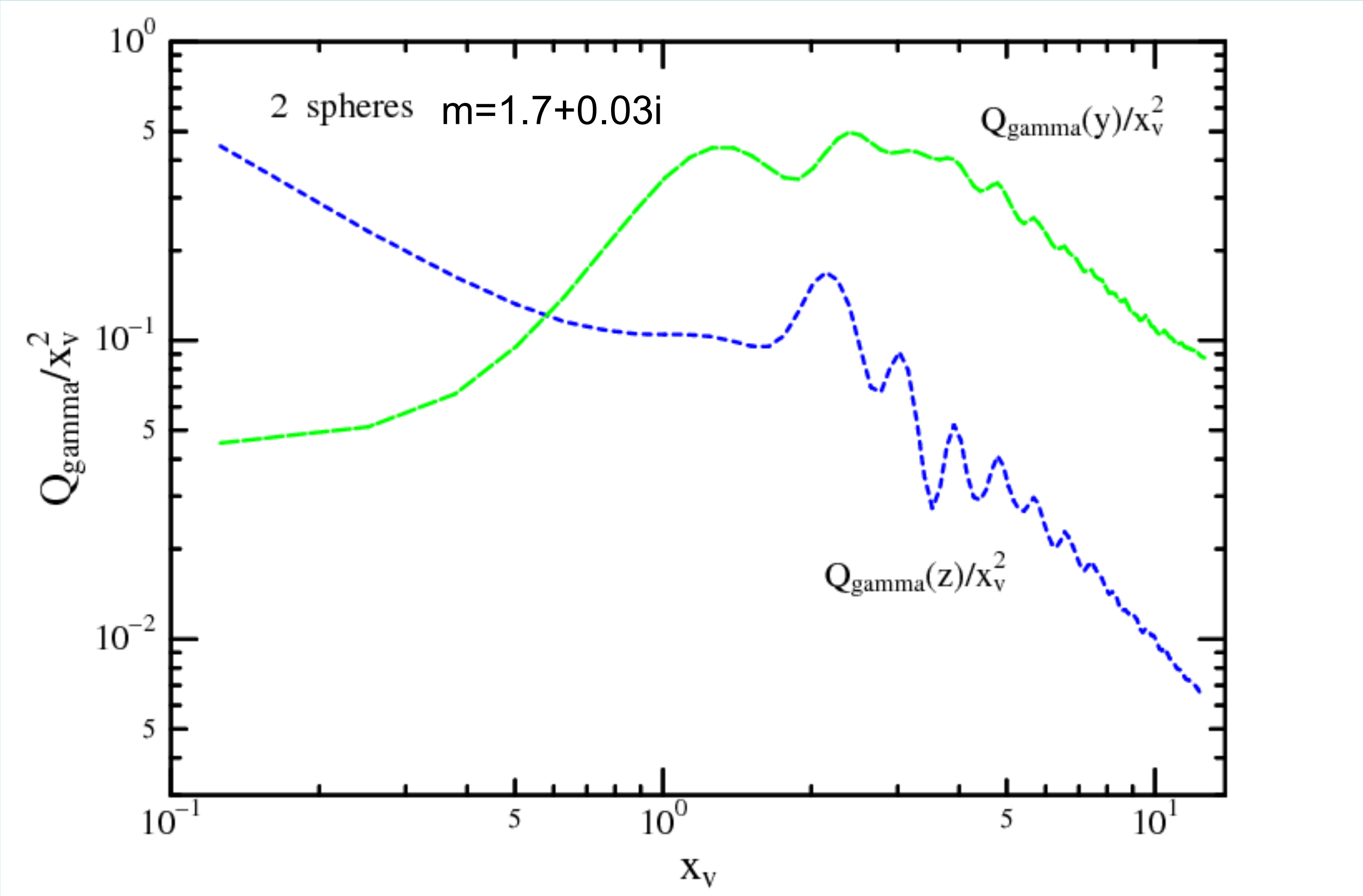
- ガスとの衝突によるトルクの変化 → Γ_{drag}
  - 1秒あたりの衝突数： $\pi a_v{}^2 nv$　v:ガスの熱的速度
  - 衝突後、回転速度分の角運動量を持ち去るとする

Jones & Spitzer（1967）

  - → $\Gamma_{drag} \sim m_H \cdot \omega a_v \cdot a_v \cdot \pi a_v^2 nv \propto a^4$

- $\Gamma_{rat} / \Gamma_{drag} \propto Q_\Gamma / x_v^2$

  - 但し、塵の半径a_v 以外は一定と仮定。



- 塵の幾何によるトルク: 小さい塵の効率は悪い
- 円偏光によるトルク: 小さい塵の効率は良い

まとめ

- MSTM法を用いて、輻射トルクが計算できることがわかった。
  - 今後: 出来れば、数値積分でなく、解析的に、カッコよく計算したい。

- 円偏光による輻射トルクと、塵の形状による輻射トルクとは、特性が異なる。

- 今後: 色々な形状の塵の計算もしたい。
  - どのように、球を配置させるか？