金融市场中幂律分布的经验和理论研究进展*
——经济物理学研究的一个前沿

张 宇[1] 张建玮[1,2,3,†] 王正行[1]

(1 北京大学物理学院 北京 100871)
(2 量子信息与量子测量教育部重点实验室 北京 100871)
(3 新疆石河子大学师范学院物理系 石河子 823003)

摘 要 对金融市场波动性的研究是经济物理(econophysics)的一个重要内容. 物理学家们借鉴物理学研究方法对金融市场中的主要变量进行的经验研究，揭示了金融资产价格涨落及相关变量概率分布尾部的幂律渐近行为. 这一性质明显有悖于传统金融学中的正态分布和试图取代它的列维分布，引起人们广泛的兴趣. 文章集中介绍了关于金融资产收益率分布尾部幂律性质经验研究的主要方法和结果，以及几种相关的理论解释.

关键词 经济物理，幂律分布，金融市场

Recent progress on power-law distributions in financial market fluctuations

ZHANG Yu[1] ZHANG Jian-Wei[1,2,3,†] WANG Zheng-Xing[1]

(1 *School of Physics, Peking University, Beijing* 100871, *China*)
(2 *Key Laboratory of Quantum Information and Quantum Measurements, Ministry of Education of China, Beijing* 100871, *China*)
(3 *Department of Physics, Teachers College, Shiheizi University, Shihezi* 823003, *China*)

Abstract The study of financial fluctuations is an important area of econophysics. Based on empirical research on the dominating variables of financial markets through the use of various physical methods, physicists have opened the door to understanding the power-law asymptotic behaviour of the price fluctuations of financial assets and the tails of the probability distributions of the variables involved. This has aroused broad interest as the power-law behaviour is quite different from the normal distribution and the suggested Lévy distribution used in conventional finance. In this paper some main empirical research methods and results of the power-law distributions of financial asset returns, together with relevant theoretical explanations, are reviewed.

Key words econophysics, power-law, financial market

1 引言

最近几十年来，物理学对复杂系统的研究取得了很大的进展. 由于经济系统与其他复杂系统具有相同或十分相似的性质，物理学家们自然设想利用处理复杂系统的理论和方法对其进行有效分析. 虽然对经济系统不可能像对一般物理系统那样进行能够控制条件的重复实验，但这一困难在诸如天体物理、大气物理和地球物理等物理领域中也同样存在. 所以，物理学家尝试采用在这些相关物理领域中的研究方法，即采取观测的方法，通过对观测数据进

* 教育部重点基金(批准号 D0 - 09)和国家重点基础研究发展计划(批准号 2001CB09308)资助项目

2004 - 01 - 17 收到初稿,2004 - 05 - 20 修回

† 通讯联系人. E-mail :james@ pku. edu. cn

行分析来发现经验规律(empirical law)，同时，也利用这些观测数据来验证理论模型的正确性. 这种研究方法不同于通常物理学中所使用的实验方法，而是一种经验方法，或者说实证方法. 所以这种研究被称为经验研究或实证研究，而这种科学则被称为经验科学或实证科学.

实际上，物理学家对经济和社会系统的兴趣可以追溯到几十年前甚至更早. 例如，Majorana 在 1942 年就发表过一篇关于物理和社会科学中的统计规律相似性的文章[1]. Roehner 在其书中对经济物理的起源和发展做了详尽的评述[2]. 但是，当数据并不丰富的时候，人们只能用逻辑的一贯性和简洁性来作为理论模型的主要判别标准. 这是数学家而非物理学家的专长. 因此，在 20 世纪 90 年代以前，只有少数物理学家涉足经济和社会领域的研究，例如 Kadanoff[3] 和 Montroll [4] 等.

20 世纪 90 年代以来，随着计算机技术的发展，获取和处理各种金融数据(例如股市，外汇市场以及其他衍生证券市场的交易数据等)变得比较容易，这在很大程度上刺激了经济物理这一学科的诞生. 物理学家们本着实验物理的精神，从经验研究出发探索经验规律. 与计量经济学家不同的是，他们引入了物理学中的分析方法，例如消除趋势波动分析(detrended fluctuation analysis) [5]，随机矩阵方法(random matrix approach) [6] 等，并类比物理(尤其是统计物理)中的一些概念和方法，对经验研究中发现的各种现象和规律进行解释和预测，例如随机动力学，短程和长程关联，自相似，标度性和普适性等. 其中 Stanley[7]，Mantegna[8,9]，Bouchaud[10]，Sornett[11] 和张翼成[12] 等人做了大量开创性的工作.

最近几年来，经济物理方面的论文广泛出现在各种物理学刊物上，这一领域的国际会议也频频召开. 1999 年，经济物理学高级研讨班及金融复杂性国际学术交流会在合肥召开，两年后，第二届复杂性科学和经济物理学的理论与应用国际学术会议又在桂林召开，标志着中国科学家也加入到这一新兴领域.

如今，经济物理研究已经包含众多方面的内容，渗透到金融学乃至经济学研究的各个方面，有兴趣对此进行全面了解的读者可以参考相关的书籍和综述，例如文献[2,7,9,10,13]. 本文则集中介绍金融市场中的幂律分布的研究，即关于收益率等变量的概率分布尾部幂律渐近行为的研究，回顾其研究背景，以及近年来这方面经验研究和理论研究的主要结果.

2 金融市场幂律分布的研究背景

金融市场是一个包含大量相互作用单元的复杂系统，并且受到各种外部因素的影响. 各个组成单元的性质和相互作用的规律相当复杂，而各种外部因素(例如与资产有关的信息)在很大程度上也不可预测. 这些原因都导致了金融市场的随机性和复杂性. 因此，人们很早就开始尝试用概率和统计的方法来研究这一类系统. 其中关于金融资产收益率分布的研究在理论和应用两方面都具有重要的意义.

1900 年，法国数学家 Bachelier 在其博士论文中详尽地研究了资产价格变化的规律[14]. 他发展了一个复杂的投机价格数学理论，并用法国政府债券的定价检验了这一理论，发现这些价格与随机漫步模型一致. 而且，他还推导了布朗运动的许多相关数学性质. 然而，由于他的工作中有一些不太严格的地方，以及其他种种原因，他这一工作的重要性并没有很快被人们认识到. 甚至在很长一段时间内，人们只知道布朗运动的数学规律是爱因斯坦在 1905 年发现的.

直到 20 世纪 50 年代以后，随着计算机技术的发展，一些经济学家进一步发展了 Bachelier 的工作[15—17]. 他们假设：金融资产对数价格变化(收益率)而非价格的绝对变化是独立分布的随机变量. 定义 $p(t)$ 为某种金融资产(例如某种股票)在 t 时刻的价格，则其收益率 $r(t)$ 为 Δt 时间内价格的对数增量，即 $r(t) \equiv \ln p(t) - \ln p(t-\Delta t)$. 实际上，当 $p(t)$ 和 $p(t-\Delta t)$ 相差不大时，由泰勒展开可以得到 $r(t) \approx [p(t) - p(t-\Delta t)]/p(t-\Delta t)$. 根据这一假设，由中心极限定理可以得到，价格的对数增量之和渐近于高斯分布：

$$P(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right). \qquad (1)$$

(1)式表示均值为 m，标准差为 σ 的正态分布概率密度函数. 对于高斯变量来说，“大的偏差”极少出现，因为其概率密度函数中 $\exp(-x^2/2\sigma^2)$ 的值随着 x 的增大迅速减小. 例如，高斯变量偏离其最可能值 2 倍标准差以上的概率仅为 5%，而大于 10 倍标准差的概率为 2×10^{-23}，几乎不可能出现. 根据这一假设，大的价格波动是极少出现的，换句话说，

收益率的分布密度函数会以指数的速率收敛到 0. 然而，中心极限定理只有在样本容量 $N\to\infty$ 时才能严格成立. 如果 N 有限，则分布的尾部可能偏离高斯分布，这对于资产定价和风险评估有着重要影响.

1963 年，Mandelbrot 在研究棉花价格时发现其收益率分布具有"胖尾和高尖峰"的现象[18]. 他引入了列维(Lévy)稳定分布来拟合收益率分布的特征. 这一稳态分布族的特征函数 $f(t)$ 满足

$$\log f(t) = \mathrm{i}\delta t - \gamma|t|^{\alpha}\left[1 + \mathrm{i}\beta\left(\frac{t}{|t|}\right)\tan\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)\right], \tag{2}$$

其中,$1<\alpha<2$ 是特征指数，$-1\leqslant\beta\leqslant1$ 是偏度参数,$\gamma>0$ 是尺度参数，δ 是位置参数. 这类分布的一个重要性质是自变量较大时的幂律行为(power-Law behaviour)，这一性质通常也被称为"帕累托(Perato)尾部"

$$L_{\mu}(x) \sim \frac{\mu A_{\pm}^{\mu}}{|x|^{1+\mu}}\ (x\to\pm\infty), \tag{3}$$

其中 L_{μ} 表示列维分布的概率密度函数,$0<\mu<2$ 是一个指数，$A_{\pm}^{\mu}$ 是两个常数，称为尾部辐角或者标度参数. 特别需要指出的是,"~"表示"渐近关系"，而非"近似关系"或者"正比关系"[19]. 列维分布可以用来描述多标度现象，也就是很大的量和很小的量常常出现的现象，例如个人收入，养老基金规模，地震的强度等. 但是，由于 $\mu<2$ 造成其方差严格地趋于无穷，给应用带来了很大困难.

1995 年，Mantegna 和 Stanley 利用 1984 年至 1989 年间 S&P500 指数(标准和普尔 500 种股票价格综合指数)研究了不同时间标度下的收益分布性质[8]. 其中最大的数据集包括 493545 个数据点(时间标度为 1min)，最小数据集包括 562 个数据点(时间标度为 1000min). 结果发现,收益率分布的中心部分和列维分布吻合得很好，但分布的尾部与列维分布有明显差别. 它比列维分布收敛速度快，而比高斯分布尾部收敛速度慢. 这一发现引起了广泛的兴趣. 随后关于股票收益率分布尾部性质的大量经验研究，发现了其幂律关系的渐近行为，以及其他各种性质[20—25]. 另外，也有研究揭示了股票市场中其他一些可观测变量的统计特征，例如交易量[26,27]和交易笔数[28]也符合类似的幂律分布. 并且，也有理论试图解释这些幂律分布以及它们之间的联系[29,30].

接下来，本文将具体介绍近年来关于股票等金融市场幂律分布的经验研究和理论研究情况.

3 金融市场一些经验研究结果

Stanley 小组的 Gopikrishnan 等人利用纽约证券交易所提供的"Trades and Quotes"数据库，对 1994—1995 年美国股市数据进行了分析[21]. 由于研究分布的尾部性质需要大量的数据，他们采用的数据集合包含市场中最大的 1000 家公司的股票在两年中的所有交易价格，共 4×10^{7} 个数据点，结果发现股票收益率符合幂律分布.

图 1 表明，累积概率分布 $P(g)\equiv P(g_i(t)\geqslant g)$ 能够很好地符合幂律关系 $P(g)\sim g^{-\alpha}$. 其中 g_i 是采用标准差 σ_i 进行归一化以后的价格增量(收益率),$g_i=r_i/\sigma_i$,$i=1,2,\cdots,1000$ 表示公司的编号(按照其在 1994 年 1 月的市场价值排序). 通过线性拟合可以得到幂指数 α 的估计值：对于正的尾部,$\alpha\approx3.1\pm0.03$；对于负的尾部,$\alpha\approx2.84\pm0.12$. 为了验证这一结果的有效性，他们用 Hill 预估方法重新估计幂指数[31]，与拟合得到的结果基本一致(对于正的尾部,$\alpha\approx2.84\pm0.12$；对于负的尾部，$\alpha\approx2.73\pm0.13$). 他们还根据 1984 年 1 月到 1996 年 11 月共 13 年间 S&P500 指数的收益率计算了其累计分布函数，也得到同样的幂指数关系.

随后，他们采用更大的数据集合分别对单个公司股票[23]和股票指数[22]收益率分布的标度行为(scaling behaviour)进行了研究. 这里所谓的标度行为，指的是收益率对应的时间标度 Δt 发生变化时(例如，从 1min 逐步增加到 1 个月)，其分布性质的相应变化情况. 由于分布矩(moments of the distribution)是表征分布性质的一个重要变量，因此可以通过分析矩的行为来研究分布的标度性质. 在文献[22]中，g 是归一化收益率，其分布的矩定义为 $\mu_k\equiv\langle|g|^k\rangle_T$. 对于 S&P500 指数，研究发现,当 Δt 属于 1min 到 4 天(1560min)的时间标度以内时，收益率都符合幂指数为 3 的幂律分布,说明这一分布具有一定的时间标度不变性. 当 Δt 大于 4 天时，随着时间标度的增加，收益率分布将缓慢地收敛到高斯分布，如图 2(a)所示.

从图 2(b)上可以看出，当 Δt 大于 4 天时，矩也随着时间标度的增加缓慢地收敛到与高斯分布的矩一致. 为了研究分布收敛的速率与收益率序列时间相关性之间的联系，可以用计算机产生一个与经

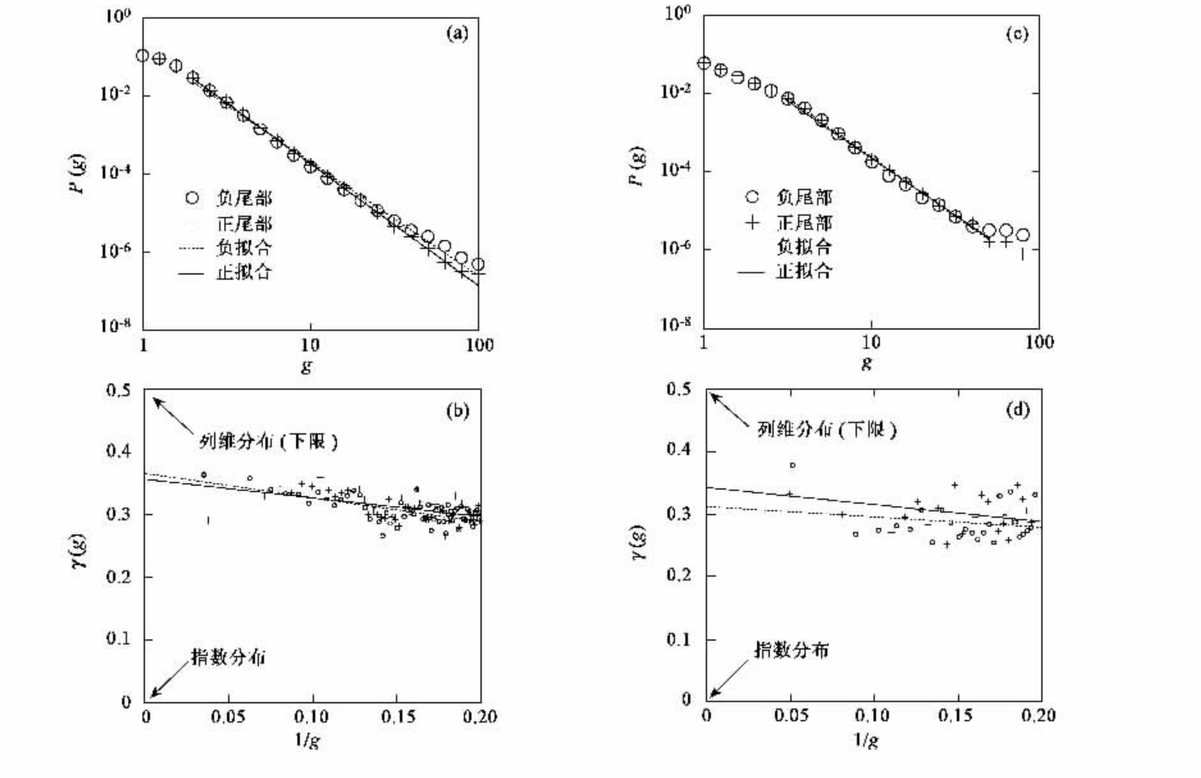

图1　对 1994—1995 年美国股市股票收益率累计概率分布 $P(g)$ 的双对数图. 其中 g 为归一化的价格增量,$\gamma(g) \equiv -(\mathrm{dlog}\, P(g)/\mathrm{dlog}\, g)^{-1}$. + 和○分别表示正尾部和负尾部的累计概率密度数据点，虚线和实线分别表示对正尾部和负尾部数据点的线性拟合. (b)和(d)图的纵轴中上下箭头分别表示 $1/g\to 0$(即 $g\to+\infty$)时,列维分布对应的 γ 值下限($\gamma=0.5$)和按照指数(exponential)收敛的高斯分布对应的 γ 值($\gamma=0$)[21]

验结果具有同样分布但是统计无关的时间序列，将其标度行为与经验数据相比较. 即构造 $X\equiv X_k, k=1,2,\cdots 4\times10^6$,并且 $P(X>x)\sim x^{-3}$，然后得到一个新的随机变量 $I_n\equiv\sum_1^n X_k$. 这种由计算机产生的数据可以称为模拟数据，它与经验数据是不可混淆的. 对于不同的 n 值，求出相应的 I_n 的累积概率分布 $P(I_n>x)$ 以及分布的矩，如图 3 所示. 将这一结果与图 2 对比可以看出，随着 n 的增加,$P(I_n>x)$ 收敛到高斯分布的速率比经验结果要快很多. 例如，当 $n=256$ 时，图 3(a)中 $P(I_n>x)$ 的曲线已经与高斯分布曲线基本重合；而根据图 2(a)所示，当 $t=16$ 天时(对应 $n=6240$)，根据经验数据得到的收益率分布曲线还没有很好收敛到高斯分布曲线. 这一现象说明，收益率序列可能存在时间相关性[32,33].

2001 年，汪秉宏等人对香港恒生指数进行了细致的研究，发现其收益率分布也具有明显的标度行为，并且分布的中心部分与列维分布一致，而分布的尾部则符合幂律分布的特征. 他们还讨论了可能对分析收益率分布尾部性质产生影响的因素[25].

另外，Matia 等人[24] 分析了 29 种商品现货价格和 13 种商品期货价格的收益率. 结果发现期货价格收益率与股票等金融资产收益率有相似的统计性质，都符合幂指数为 3 的幂律分布. 这说明它们可能属于同一个普适类(universality class)，具有相同的动力学机制. 而现货价格的收益率分布虽然也符合幂律分布，但幂指数只是略大于 2，与以上二者有显著差别，比较接近 Mandelbrot 研究棉花价格时得到的结果. 这说明现货市场和金融市场的动力学机制可能有所不同.

除了股票价格收益，股票交易量[26,27] 和股票交易笔数[28] 也被发现具有类似的幂律分布性质,即

$$P(|V_t|>x)\sim x^{-\xi_V},\quad P(|N_t|>x)\sim x^{-\xi_N}, \tag{4}$$

其中 V_t 表示交易量,N_t 表示交易笔数,$\xi_V\approx1.5$，$\xi_N\approx3.4$.

以上这些经验研究揭示了股票市场中收益率等变量的幂律分布性质及其标度行为和普适性，很容易让人联想到物理学家在临界现象的实验研究中得到的标度律和普适性，以及对其进行理论解释的重

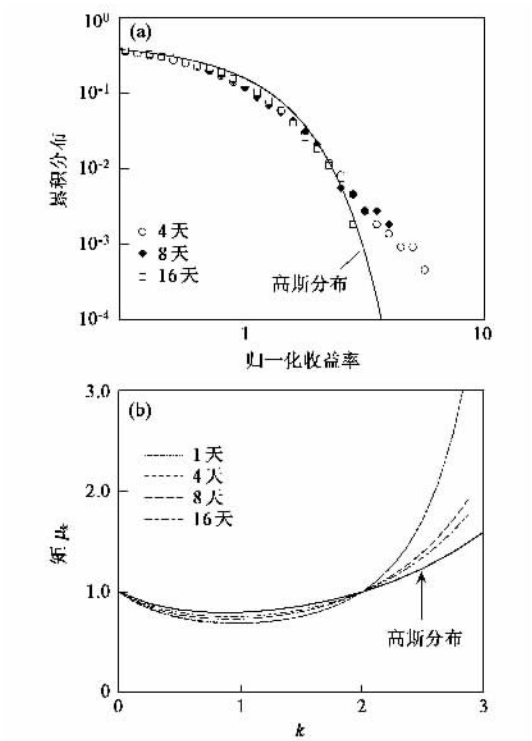

图2 （a）S&P500 指数收益累计概率分布（cumulative distribution）的正尾部．横轴表示归一化收益（normalized returns），时间标度 Δt 分别为 4，8，16 天（days），实线表示具有零均值和单位方差的高斯（Gaussian）分布；（b）不同时间标度下的矩（moments）μ_k．随着时间标度的增加，所对应的矩缓慢地收敛到与高斯分布的矩，Δt = 1 天和 Δt = 4 天的曲线基本重合[22]

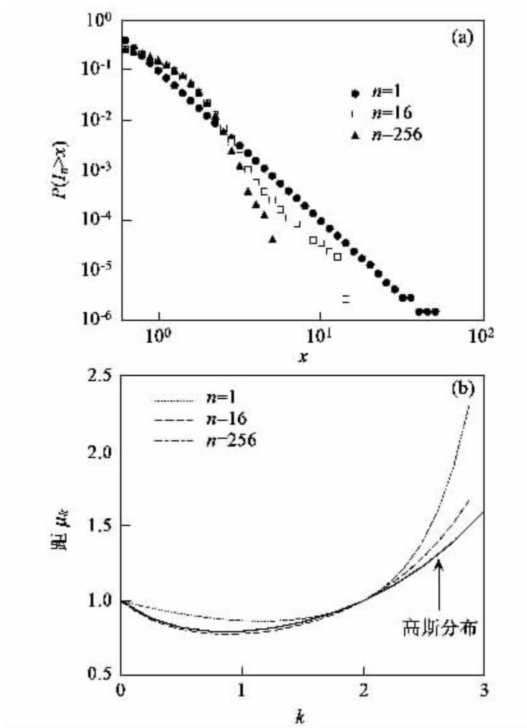

图3 不相关变量分布的收敛情况［首先产生一个时间序列 X_k，其分布 $P(X\geqslant x)$ x^{-3}．然后计算出变量 $I_n \equiv \sum_{i=1}^{n} X_k$，其中 $n=1,16,256$．（a）I_n 的累计分布函数曲线．其中 $n=256$ 时已经与高斯分布曲线（实线）基本重合；（b）$n=1,16,256$ 时分布的矩 μ_k[22]］

正化群方法[34,35]，那么，股票中这几个幂律分布的理论解释又是什么呢？

4 相关理论解释

目前对于金融市场中收益率幂律分布的理论解释，主要有以下几个．

Bouchaud 和 Potter 提出了一个关于波动相关和分布尾部的模型[10]．该模型表明，过去的大的波动影响市场现在的活力，而这导致了概率分布的尾部，并且还导致了波动的相关．这一模型与自回归条件异方差（ARCH）模型在本质上很接近．他们指出市场波动的行为类似布朗粒子运动，其概率分布满足 Fokker－Planck 方程．后者在稳态条件下得到解的形式为

$$P(x) = x^{-(2+\beta)}\exp\left(-\frac{\alpha}{x}\right), \tag{5}$$

其中 $0<\alpha,\beta<1$．进一步可以证明，收益率累计分布的尾部具有幂律关系．

Solomon 等人采用推广的 Lotka－Volterra（LV）模型给出了股票收益率和交易量幂律分布的另一个理论解释[29]．他们假定社会中个体（个人或机构）的财富变化符合 LV 模型，即在共享资源条件下的生物群体竞争的动力学模型．这个模型还可以描述许多社会、经济活动中的合作、竞争行为．它的一般解的形式为对数形式，或称为反转 Fermi 分布[36]，故又称为 Logistic 模型．

在有效市场假定下，即认为所有个体在长的时间间隔内对投资具有相同的相对回报，得到相对财富 x 的概率分布函数与（5）式类似，为

$$P(x) \sim x^{-(2+\beta)}\exp\left(-\frac{\beta}{x}\right), \tag{6}$$

式中 $0<\beta<1$．容易看出这个结果在 $x_0=\beta/(1+\beta)$ 处出现极大值，在 $x<x_0$ 时下降极快，而在 $x\to 1$ 时表现幂律形式 $P(x)\sim x^{-(2+\beta)}-\beta x^{-(3+\beta)}+\cdots$，可见，首项中负幂指数在 2—3 之间．

而 Gabaix 等人则假设较大的市场波动（统计分布的尾部性质）主要受较大的市场参与者（各种共同基金）行为的影响，基金管理人基于利润最大化

的优化行为导致了股票市场中的几个幂律分布[30]．他们首先分析了共同基金的分布情况．定义共同基金的规模（根据所管理资产的市场价值）为 S，根据 1961 年到 1999 年的数据，基金规模在前 10% 的共同基金的分布符合幂律关系：$P(S > x) \sim x^{-\xi_S}$，其中 $\xi_S = 1.05 \pm 0.08 \approx 1$．由此其概率密度函数 $\rho(S)$ 为 $\rho(S) \sim S^{-2}$．

其次，他们根据经验研究中发现价格影响（price impact）Δp 对于交易量 V 具有上凸且递增的函数形式[37]，他们从市场微观结构出发，利用优化的方法给出大笔交易 V 和 Δp 之间的函数关系为 $r = \Delta p \simeq kV^{1/2}$，其中 k 是一常数．

另外，他们定义 $c(S)$ 表示一年内基金在交易导致的价格影响中付出的成本与基金规模 S 的比值．对于基金规模为 S 的基金，某一次大笔交易 $V(S)$ 导致的价格影响正比于 $V(S)\Delta p$，假定 $F(S)$ 是基金的年交易频率，得到

$$c(S) = F(S)\frac{V(S)\Delta p}{S} = F(S)\frac{[V(S)]^{3/2}}{S}. \quad (7)$$

假定 $c(S)$ 与 S 无关，也就是说，不同规模的基金付出相同的成本——这被称为"生存限制（survival constraint）"，因为太大的 $c(S)$ 将导致基金的收益率过小，从而被市场所淘汰．因此，由（7）式得到 $F(S) \sim S[V(S)]^{-3/2}$．由一个技术性的合理假设 $V \sim S^{\delta}$，$\delta > 0$，可以推导出交易量的幂律分布

$$P(V > x) \sim \int_{S^{\delta} > x} F(S)\rho(S)\,\mathrm{d}S \sim x^{-3/2} \quad (8)$$

并由此得到收益率和交易笔数的幂律分布，以及相应的幂指数．

以上这几个理论分别在一定程度上解释了金融市场中收益率等变量的幂律分布行为，与经验研究的结果相符合．但其中都存在一些有待进一步检验的假设，例如有效市场和生存限制等假设，都是一些理想化的情况．

5 展望

大量的经验研究揭示了股票市场和其他金融市场中的幂律分布及其标度行为和普适性，这是经济和社会领域中广泛存在的现象．随着统计数据的进一步丰富，类似的经验研究还会继续．现有的相关理论解释，也还有待进一步的检验和发展．

值得注意的是，在经济物理的研究中，虽然类比统计物理的方法进行建模往往行之有效[38]，但经济系统毕竟有不同于物理系统的特殊性，而且经济现象中的参与者是具有思想的个体，其行为与统计物理中研究的各种微观粒子有所不同．因此，物理学家在涉足这一领域的时候，应该尽可能了解各种经济系统的实际情况，与经济学家紧密合作，才能让经济物理学得到更好的发展[39]．

杨振宁先生最近说："21 世纪的物理学将有长足发展，可是将与 20 世纪的物理学重点大大不同．"[40] 物理学扩展至社会科学领域的趋势现在已经初见端倪，把物理学中发展成熟的理论方法和研究风格引入到社会科学领域，则是物理学家面临的一个全新机遇和挑战．

参 考 文 献

[1] Majorana E. Scientia，1942，36：58
[2] Roehner B M. Patterns of Speculation：A Study in Observational Econophysics. Cambridge：Cambridge University Press，2002
[3] Kadanoff L P. Simulation，1971，16：261
[4] Montroll E W，Badger W W. Introduction to Quantitative Aspects of Social Phenomena. New York：Gordon and Breach，1974
[5] Hu K *et al*. Phys. Rev. E，2001，64：011114
[6] Plerou V *et al*. Phys. Rev. E，2002，65：066126
[7] Stanley H E *et al*. Physica A，1999，269：156
[8] Mantegna R N *et al*. Nature，1995，376：46
[9] Mantegna R N，Stanley H E. An Introduction to Econophysics：Correlations and Complexity in Finance. Cambridge：Cambridge University Press，2000
[10] Bouchaud J P，Potters M. Theory of Financial Risks：from statistical physics to risk management. Cambridge：Cambridge University Press，2000
[11] Sornette D. Physica A，1997，245：411
[12] Challet D，Zhang Y C. Physica A，1998，256：514
[13] 李平，汪秉宏，全宏俊. 物理，2004，33（1）：28［Li P，Wang B H，Quan H J. Wuli（Physics），2004，33（1）：28（in Chinese）］李平，汪秉宏，全宏俊. 物理，2004，33（3）：205［Li P，Wang B H，Quan H J. Wuli（Physics），2004，33（3）：205（in Chinese）］
[14] Bachelier. Annales Scientifiques de l′Ecole Normale Supérieure，1900，Ⅲ－17：21
[15] Kendall，M J. Journal of the Royal Stat. Soc.，1953，96：11
[16] Roberts，H V. Journal of Finance，1959，14：1
[17] Osborne M M. Operations Research，1959，7：145
[18] Mandelbrot B B. J. Business，1963，36：394
[19] Stanley H E，Quantitative Finance，2001，1：563
[20] Lux T. Appl. Financial Econom.，1996，6：463
[21] Gopikrishnan P *et al*. Eur. Phys. J. B，1998，3：139
[22] Gopikrishnan P *et al*. Phys. Rev. E，1999，60：5305；Gopikrishnan P *et al*. preprint cond-mat/0212097
[23] Plerou V *et al*. Phys. Rev. E，2002，66：027104
[24] Matia K *et al*. Phys. Rev. E，2002，66：045103
[25] Wang B H，Hui P M. Eur. Phys. J. B，2001，20：573
[26] Gopikrishnan P *et al*. Phys. Rev. E，2000 62：R4493
[27] Maslov S *et al*. Physica A，2001，299（1—2）：234
[28] Plerou V *et al*. Phys. Rev. E，2000，62：R3023
[29] Solomon S *et al*. Physica A，2001，299：188
[30] Gabaix X *et al*. Nature，2003，423：267
[31] Hill B M. Ann. Stat.，1975，3：1163

[32] Dacorogna M M *et al*. J. International Money and Finance, 1993, 12: 413
[33] Liu Y *et al*. Physica A, 1997, 245: 437.
[34] Fisher M E. Rev. Mod. Phys., 1998, 70: 653
[35] Stanley H E. Rev. Mod. Phys., 1999, 71: S358
[36] 王正行, 张建玮, 唐毅南. 物理, 2003, 32(5): 341 [Wang C S, Zhang J W, Tang Y N. Wuli (Physics), 2003, 32(5): 341 (in Chinese)]
[37] Plerou V *et al*. Phys. Rev. E, 2000, 66: 027104
[38] Gligor M. Interdiscip. Sci. Rev., 2001, 26: 183
[39] Buchanan M. Nature, 2002, 415: 10
[40] 北京大学校报, 2003 年 10 月 20 日第 1002 期第 1 版 [Periodical Universitatis Pekinensis, October 20, 2003 (1002): Front page (in Chinese)]

· 物理新闻和动态 ·

地震波出现弱局域化

法国傅里叶大学(University Joseph Fourier of Grenoble)和法国国家科学研究中心以 Tiggelen B V 博士为首的一群科学家在自然条件下观察到地震波具有瞬间的局域态. 在过去的几年内,科学家们在实验室的条件下分别观察到光波、电子波的局域性质;例如电子波在某些材料内传播,以及光波在通过牛奶或酒等漫射介质时,它们都能多次反复地散射,但不会吸收,也就是说它们的能量可以局域在一个小区间内而形成"孤波". 但像法国 Tiggelen 博士研究组在如此巨大的地球尺度范围内观察到地震波的局域现象,这还是第一次;同时他们的观测是在几乎无法人为控制的自然条件下. 他们寻找和发现的这个实例可能将成为找到"地震波孤子(seismic insulator)"的第一步,即在地球内极不均匀的地质环境下,波可以多次散射而不被吸收. 他们实验观察到的地震波都是在法国 Auvergene 地区的火山岩内传播,并利用一组探测器方阵对它们进行追踪记录的.

Tiggelen 博士的研究组在过去曾发现,在某些地区发生地震后,在其周围的地下环境内存在着地震波的振动. 现在这群科学家们提出可以对地震波的相干行为进行探测,从而可用此方法来确定无规行走的地震波的平均波长.

(云中客　摘自 Phys. Rev. Lett., 23 July 2004)